

Entwicklung von Bodenschwermetallgehalten auf ausgewählten landwirtschaftlich genutzten Bodendauerbeobachtungsflächen in Thüringen im Zeitraum von 20 Jahren

Bachelorarbeit

vorgelegt von:

Toni Schirdewahn

Studiengang: Geographie (B.Sc.)

Semester: 6/6

Matrikelnummer: 117294

toni.schirdewahn@uni-jena.de

Gutachter:

Prof. Dr. Beate Michalzik

Friedrich Schiller Universität Jena

beate.michalzik@uni-jena.de

Dr. Volkmar König

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

volkmar.koenig@tll.thueringen.de

Abgabedatum: 02.09.2013

Inhalt

Danksagung	3
Abbildungen	4
Tabellen	6
Abkürzungen	7
Zusammenfassung	8
1 Einleitung	9
2 Hintergrund	11
2.1 Bodendauerbeobachtung in Deutschland	11
2.2 Kompetenzverteilung und Flächenauswahl in Thüringen	13
2.3 Aufbau und Beprobung einer BDF	15
3 Theoretische Vorbetrachtungen zu Schwermetallen in Böden	17
3.1 Definition und Eigenschaften	17
3.2 Pedogene Prozesse	18
3.3 Wirkung auf Mensch und Umwelt	23
3.4 Konzept der Critical Loads	24
4 Material und Methoden	26
4.1 Standortauswahl und Beschreibung	26
4.2 Probennahme	28
4.3 Probenvorbereitung und Messverfahren	29
4.4 Datenauswertung und Fehlerquellen	30
5 Ergebnisse	32
5.1 Geogene Gehalte aus dem Totalaufschluss	32
5.2 Entwicklung der Schwermetallgehalte aus dem Königswasseraufschluss	35
5.3 Korrelationsverhältnisse zwischen Bodenparametern und dem Schwermetallgehalt	41
5.4 Pflanzenverfügbarkeit und Nährstoffversorgung	48
5.5 Methodenvergleich	50
6 Diskussion	52
7 Fazit und Ausblick	55
Literatur	56
Anhang	61

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei denjenigen bedanken, die mich bei der Anfertigung der nachfolgenden Arbeit unterstützt haben. In erster Linie sind dabei Herr Günter Marre und Frau Karin Marschall von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft zu erwähnen, die mich zur Bearbeitung dieses Themas inspiriert und im folgenden Arbeitsprozess stets unterstützt haben. Weiterhin gilt mein Dank Prof. Dr. Beate Michalzik, die diese Arbeit erstbetreut hat und mir stets Anregungen zur inhaltlichen und grafischen Gestaltung gab. Herrn Dr. Volkmar König möchte ich dafür Danken, dass er sich kurzfristig dazu bereit erklärt hat die Zweitbetreuung dieser Arbeit zu übernehmen. Darüber hinaus möchte ich allen Mitarbeitern der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft für ihre Hilfsbereitschaft bei inhaltlichen Fragen, sowie meiner Familie und Freunden für die formale Korrektur dieser Arbeit danken.

Abbildungen

- Abb. 1.1: Typische Wirkungskurven (a) von essentiellen Spurenelementen; (b) von nicht essentiellen Spurenelementen
- Abb. 2.2.1: Lage der BDF Standorte in Thüringen
- Abb. 2.2.2: Grad der Flächenabdeckung Thüringens
- Abb. 2.3.1: Aufbau einer Bodendauerbeobachtungsfläche in Thüringen
- Abb. 3.3.1: Schwermetалldynamik in Böden sowie das System Boden-Pflanze
- Abb. 3.3.2: Bleigehalte im Boden in Abhängigkeit des Abstandes vom Autobahnrand
- Abb. 3.3.3: Verbindungen von Blei und Cadmium in der Bodenlösung in Abhängigkeit vom pH Wert in Kalkböden bei 25 °C
- Abb. 3.4.1: Vereinfachtes Konzept der Critical Loads
- Abb. 3.4.2: Critical Loads zum Ökosystemschutz für Blei in Deutschland
- Abb. 4.2.1: Aufbau und Probenahmen auf einer BDF
- Abb. 5.1.1: Geogene Schwermetallkonzentrationen von Cd, Pb, Hg, Cu, Zn in ausgewählten landwirtschaftlich genutzten BDF in Thüringen
- Abb. 5.2.1: Mittelwerte der Schwermetallgehalte für Cadmium und deren Standardabweichung auf ausgewählten BDF in:
a) Tiefe 1; b) Tiefe 2 und c) Tiefe 3
- Abb. 5.2.2: Mittelwerte der Schwermetallgehalte für Blei und deren Standardabweichung auf ausgewählten BDF in:
a) Tiefe 1; b) Tiefe 2 und c) Tiefe 3
- Abb. 5.2.3: Mittelwerte der Schwermetallgehalte für Quecksilber und deren Standardabweichung auf ausgewählten BDF in:
a) Tiefe 1; b) Tiefe 2 und c) Tiefe 3

- Abb. 5.2.4: Mittelwerte der Schwermetallgehalte für Zink und deren Standardabweichung auf ausgewählten BDF in:
a) Tiefe 1; b) Tiefe 2 und c) Tiefe 3
- Abb. 5.2.5: Mittelwerte der Schwermetallgehalte für Kupfer und deren Standardabweichung auf ausgewählten BDF in:
a) Tiefe 1; b) Tiefe 2 und c) Tiefe 3
- Abb. 5.3.1: Zusammenhang von Schwermetallgehalt: a) Cadmium, b) Blei, c) Quecksilber, d) Zink, e) Kupfer aus dem Königswasseraufschluss und dem Gehalt an organischem Material
- Abb. 5.3.2: Zusammenhang von Schwermetallgehalt: a) Cadmium, b) Blei, c) Quecksilber, d) Zink, e) Kupfer aus dem Königswasseraufschluss und dem pH-Wert
- Abb. 5.3.3: Zusammenhang von Schwermetallgehalt: a) Cadmium, b) Blei, c) Quecksilber, d) Zink, e) Kupfer aus dem Königswasseraufschluss und dem Tongehalt
- Abb. 5.5.1: Darstellung des Bestimmtheitsmaßes r -Quadrat von Total- und Königswasseraufschluss und der Anteile der Königswasser aufgeschlossenen Gehalte am Gesamtgehalt

Tabellen

Tab. 3.3.1:	natürliche und anthropogene Eintragsquellen für einige Schwermetalle in [g ha ⁻¹ a ⁻¹]
Tab. 5.1.1:	Median der Hintergrundgehalte für die Oberböden ausgewählter Thüringer Bodenlandschaften
Tab. 5.3.1:	r ² für den Zusammenhang von Schwermetallgehalt und Corg-Gehalt
Tab. 5.3.2:	r ² für den Zusammenhang von pH-Wert und Schwermetallgehalt
Tab. 5.3.3:	r ² für den Zusammenhang von Tongehalt und Schwermetallgehalt
Tab. 5.4.1:	Prüfwerte aus dem Ammoniumnitataufschluss (Acker) und Maßnahmenwerte aus dem Königswasseraufschluss (Grünland)
Tab. 5.4.2:	Methodenvergleich und Analyse der Pflanzenversorgung mit Mikronährstoffen (lila: überversorgt, grün optimale Versorgung, gelb: unterversorgt)

Abkürzungen

AN	Ammoniumnitrat-aufschluss
BDF	Bodendauerbeobachtungsflächen
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
bzw.	beziehungsweise
Cd	Cadmium
Cu	Kupfer
EU	Europäische Union
FAO	Food and Agriculture Organization
HF	Totalaufschluss
Hg	Quecksilber
KW	Königswasseraufschluss
NN	Normal Null
P	Bestimmung der pflanzenverfügbaren Nährstoffe nach „klassischer Methode“
Pb	Blei
TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
TLUG	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
ThürBodSchG	Thüringer Bodenschutzgesetz
WHO	World Health Organization
Zn	Zink

Zusammenfassung

Die nachfolgende Arbeit untersucht die Entwicklung der Schwermetallgehalte von Cadmium, Blei, Quecksilber, Kupfer und Zink auf drei Bodendauerbeobachtungsflächen unter Ackernutzung und einer Fläche auf Dauergrünland in Thüringen. Die Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft und schloss sich an das Berufsorientierte Praktikum an.

Steigende Tendenzen sind für Cadmium, Zink und Kupfer nicht erkennbar. Die Quecksilbergehalte sind sogar leicht rückläufig. Bei Blei wurde der Vorsorgewert im Jahr 1993 auf einer Fläche einmalig überschritten. Als mögliche Ursachen konnten eine ehemalige Farbenfabrik, sowie eine stärkere atmosphärische Deposition infolge der Höhenlage dieses Standortes ausgemacht werden. Für alle anderen Schwermetalle lagen die Gehalte auf den betrachteten Flächen weit unterhalb der in der BBodSchV definierten Vorsorge-, Prüf-, und Maßnahmenwerte, sodass aktuell keine Gefährdung hinsichtlich des Bodenschutzes sowie der Nahrungsmittelproduktion erkennbar ist.

Die Schwermetallgehalte sind, mit Ausnahme von Kupfer, auf den ackerbaulich genutzten BDF signifikant geringer als jener auf Dauergrünland. Diese Tatsache kann einerseits mit Hilfe der geogenen Gehalte begründet werden. Andererseits führt die Bodenbearbeitung auf Ackerflächen zu einer ständigen Durchmischung im Boden.

Mit einer Korrelationsanalyse wurde die Abhängigkeit der Schwermetallgehalte von pH-Wert, Tongehalt und dem Corg-Gehalt geprüft. Dabei scheint letztgenanntes den wohl stärksten Einfluss auf die Schwermetallgehalte, insbesondere von Blei, Quecksilber und Cadmium zu haben, was durch ein hohes Bestimmtheitsmaß bestätigt wurde. Die Abhängigkeit von pH-Wert und Tongehalt ist hingegen schwächer ausgeprägt. Die Auswertung nach Ammoniumnitrat- und klassischer Methode ergab, dass nur ein geringer Anteil der im Boden vorhandenen Schwermetalle auch pflanzenverfügbar ist.

1 Einleitung

Die Pedosphäre mit ihrer Vielfalt an Böden bildet die Schnittstelle zwischen Atmosphäre, Lithosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre (BÄUMLER 2007:363). Als dünne, verletzbare Schicht, ist sie im globalen Durchschnitt bei einem Erdradius von 6370 km nur 60 cm mächtig (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:1). Lediglich 12 % der Erdoberfläche sind landwirtschaftlich nutzbare Böden (GSF 2012:2). Dabei steht einer steigenden Bevölkerungszahl eine gleich bleibende bzw. durch Degradation tendenziell geringe landwirtschaftlich nutzbare Fläche gegenüber. In den letzten Jahrzehnten hat sich diese von 0,5 Hektar pro Person im Jahr 1960 (GSF 2012:2), auf 0,22 Hektar pro Person bei einer Weltbevölkerung von 6,7 Milliarden bis Anfang des 21. Jahrhunderts verringert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:5). Für Mensch und Umwelt sind Böden aufgrund ihrer Lebensraum-, Nutzungs-, Transformator-, Filter-, Puffer- und Archivfunktion (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:449) unverzichtbar. „Böden gehören daher neben Wasser und Luft zu unseren kostbarsten natürlichen Ressourcen“ (BÄUMLER 2007:363). Diese Funktionen werden durch überwiegend anthropogen verursachte, stoffliche Belastungen wie industrielle Emissionen sowie dem Ausbringen von Schlämmen und nicht stofflichen Belastungen in Form von Erosion oder Verdichtung der Böden, gefährdet (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:449). Fälschlicherweise ist in der öffentlichen Diskussion die Annahme, alle Elemente dieser Gruppe seien giftig, stark verbreitet (NICKEL INSTITUTE 2006:6). Dabei sind einige Schwermetalle, wie beispielsweise Kupfer und Zink, in gewissen Konzentrationen unverzichtbar für Mensch und Umwelt (Abb.1.1). Blei, Quecksilber und Cadmium wirken dagegen schon in geringen Mengen stark toxisch und werden vom Menschen unter anderem über die Nahrung aufgenommen. Die Bodendauerbeobachtung in Deutschland leistet einen Beitrag zur langfristigen Überwachung der Konzentration von Schwermetallen in Böden in Abhängigkeit von der Landnutzung.

In der nachfolgenden Arbeit soll die stoffliche Belastung landwirtschaftlich genutzter Flächen durch die Schwermetalle Blei, Cadmium, Kupfer, Quecksilber und Zink untersucht und deren Entwicklung in den letzten 20 Jahren dargestellt werden. Zentrale Fragestellung ist es, Tendenzen einer Anreicherung der untersuchten Schwermetalle in Böden seit Beginn der Datenerfassung in Thüringen zu ermitteln, bzw. Ursachen für eine Abnahme, Stagnation oder Zunahme zu ergründen. Die in dieser Arbeit ausgewerteten und diskutierten Messdaten stammen aus dem Bodendauerbeobachtungsprogramm in Thüringen.

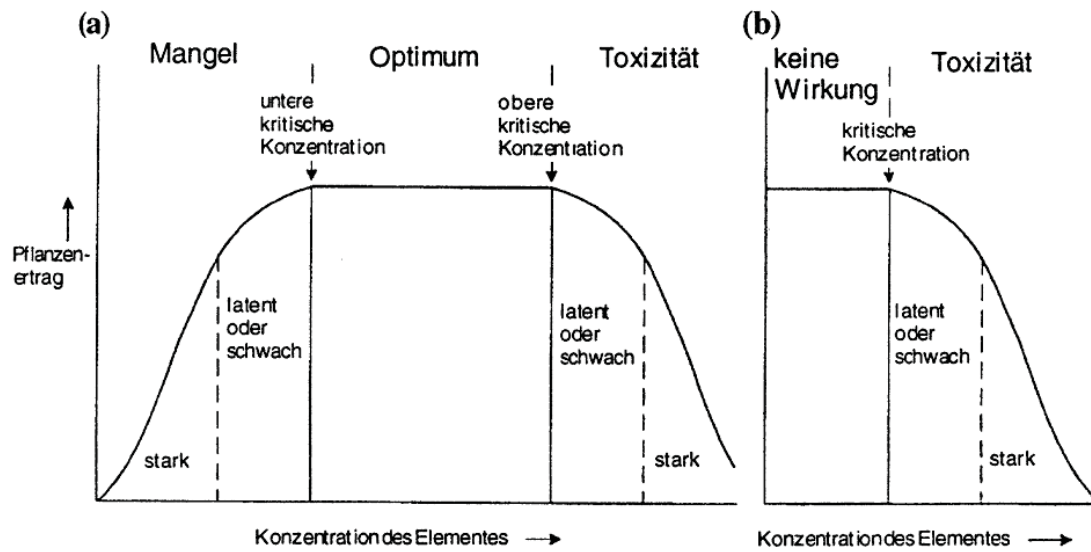


Abb. 1.1: Typische Wirkungskurven (a) von essentiellen Spurenelementen; (b) von nicht essentiellen Spurenelementen (ALLOWAY 1999:35)

2 Hintergrund

2.1 Bodendauerbeobachtung in Deutschland

Grundlage für die Nutzung und Bewirtschaftung von Flächen in Deutschland ist das am 17. März 1999 in Kraft getretene Bundes-Bodenschutzgesetz. Dessen Zweck ist es: „(...) nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen“ (BBODSCHG 1998:3). In §4 sind Pflichten zur Gefahrenabwehr geregelt. Schädliche Bodenveränderungen sind demnach abzuwehren und eingetretene Schäden, soweit dies zumutbar ist, zu sanieren (ebd.). Grundstückseigentümer sind gemäß §7 dazu verpflichtet, diese Veränderungen schon durch Vorsorge zu vermeiden. Bei landwirtschaftlich genutzten Flächen wird diese Vorsorgepflicht durch die in § 17 beschriebenen Maßnahmen der „guten fachlichen Praxis“, gewährleistet. Zur Umsetzung des BBodschG wurden auf Länderebene weitere Gesetze erlassen. In Thüringen ist dies das Thüringer Bodenschutzgesetz (ThürBodSchG).

Ergänzt wird das Bundesbodenschutzgesetz durch die Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung. Darin werden bundeseinheitliche Werte sowie die für deren Bestimmung notwendige Probenahme und Analytik definiert (AH BOGws 2012:o.S.). Eingeteilt werden diese, hierarchisch aufsteigend in ihrer Bewertung, in Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte (ebd.).

Vorsorgewerte: Sollen den langfristigen Schutz der Bodenfunktionen, nach dem Vorsorgeprinzip, unter aktueller und zukünftiger Nutzung sicherstellen.

Prüfwerte: Die Überschreitung führt zu einer einzelfallbezogenen Prüfung der entsprechenden Flächen im Hinblick auf Nutzung, Bodenart, Mobilität der entsprechenden Schadstoffe und anderen Gegebenheiten.

Maßnahmenwerte: Die Überschreitung zeigt eine von den betroffenen Flächen ausgehende Gefahr an.

Prüf- und Maßnahmenwerte sind Orientierungswerte und keinesfalls Grenzwerte, sodass nach Definition im Einzelfall ein Ermessensspielraum verbleibt und eine Überschreitung zu keinen rechtsverbindlichen Aktionen (z.B. Sanierungsmaßnahmen) führen muss (AH BOGws 2012:o.S.).

Auf EU-Ebene existieren derzeit keine rechtsverbindlichen Vorschriften zum Schutz der Böden (UBA 2010:o.S.). Indirekt soll der Bodenschutz durch mehrere Richtlinien wie der Richtlinie über Nitrat, der Richtlinie über Klärschlamm oder der Wasserrahmenrichtlinie gewährleistet werden. Seit September 2006 liegt ein Entwurf der EU Kommission für eine Bodenschutzstrategie vor (ebd.).

Die Bodendauerbeobachtung ist jenes Instrument, mit dem die Vorgaben des Bundesbodenschutzgesetzes durch langfristige Überwachung überprüft werden sollen. Das Programm begann Mitte der 1980er Jahre in den alten Bundesländern. Anfang der 1990er Jahre wurden erste Flächen in den neuen Bundesländern angelegt. Die bundesweite Abstimmung zu Einrichtung und Betrieb der Bodendauerbeobachtungsflächen organisiert die „1996 eingerichtete Ad-hoc-AG „Boden-Dauerbeobachtung“ des ständigen Ausschuss 2 „Informationsgrundlagen“ der Bund/Länder AG Bodenschutz (LABO)“ (UBA 2002:1).

Ziel der Boden-Dauerbeobachtung ist es, den aktuellen Zustand der Böden zu beschreiben, ihre Veränderungen langfristig zu überwachen und Prognosen zur zukünftigen Entwicklung zu erstellen (Barth et al. 2001:4). Die grundlegenden Aufgaben können unter den Oberbegriffen Dokumentation, Monitoring und Beweissicherung zusammengefasst werden (UBA 2002:1).

Im Hinblick auf die Aufnahme von Schwermetallen durch Nutzpflanzen, ist die Kontrolle der Gehalte im Boden ein wesentlicher Bestandteil zur Einhaltung der Grenzwerte in Lebensmitteln. Diese wurden von der EU Kommission im Jahr 2006 durch die Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 „zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln“, geregelt. Danach sollen die Gehalte an Kontaminanten zum Schutz der öffentlichen Gesundheit auf toxikologisch vertretbare Werte begrenzt werden, wobei die Höchstgehalte so niedrig festzulegen sind, wie dies durch eine gute Landwirtschafts-, Fischerei und Herstellungspraxis erreichbar ist (DIE KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN 2006:L 364/5). Derzeit werden in Deutschland ca. 800 Bodendauerbeobachtungsflächen betrieben (BMU 2009:60)

2.2 Kompetenzverteilung und Flächenauswahl in Thüringen

In Thüringen wurden unter Federführung der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie im Zeitraum von 1992 bis 2005 32 BDF Flächen eingerichtet (Abb. 2.2.1). Davon werden 12 Standorte, insbesondere solche in Gebieten mit bekannter stofflicher Belastung, von der TLUG selbst, neun Flächen unter Forstnutzung von der Anstalt öffentlichen Rechts „ThüringenForst“ und 14 landwirtschaftlich genutzte Flächen von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft betreut.

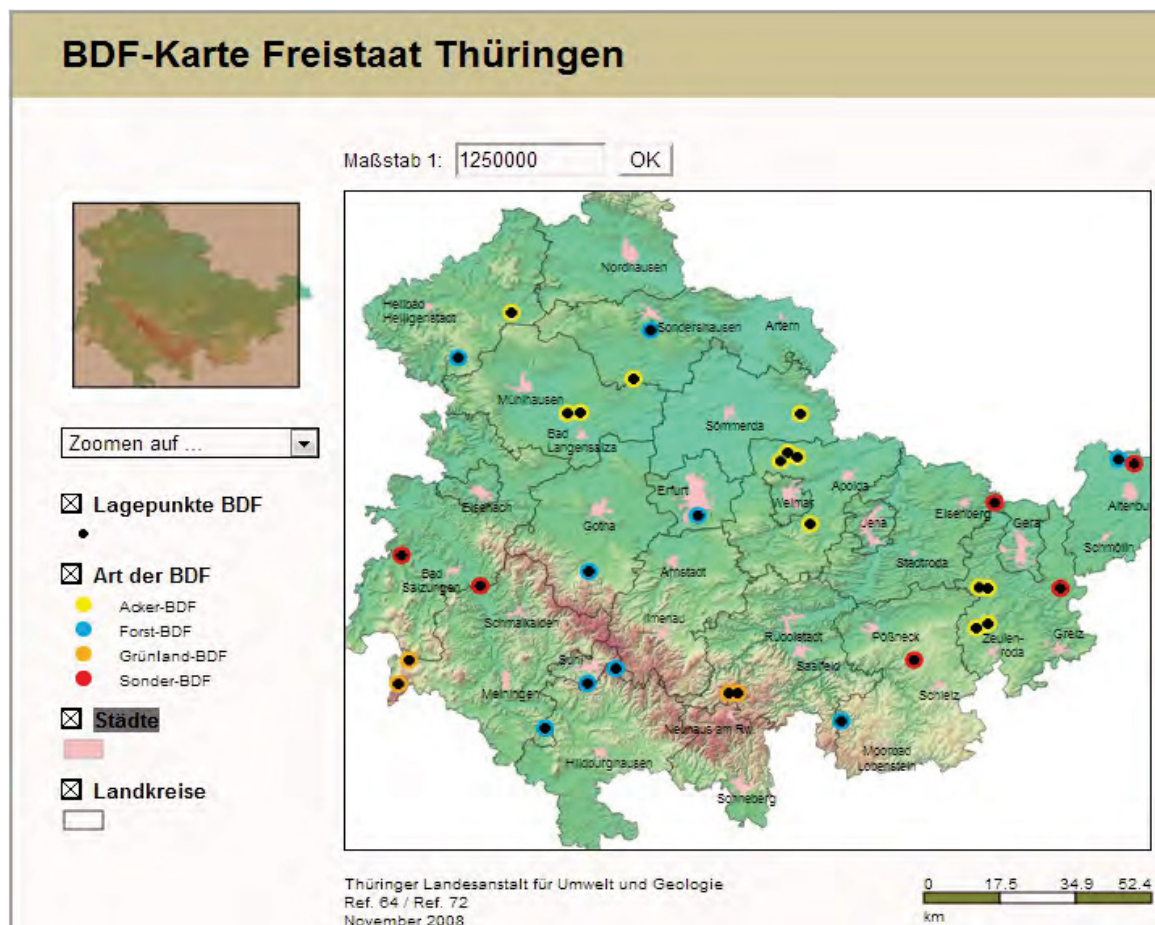


Abb.2.2.1: Lage der BDF Standorte in Thüringen (TLUG 2008:o.S.)

In einem ersten Schritt wurden bis 1999, gestützt auf Expertenwissen, 22 Flächen eingerichtet. Auswahlkriterien dabei waren Landschaftsrepräsentanz, Bodenrepräsentanz, Nutzungsrepräsentanz, Belastungsrepräsentanz, Einbindung in bestehende oder geplante Messnetze sowie die langfristige Verfügbarkeit der Bodendauerbeobachtungsflächen

(BARTH et al. 2001:10). Bis zum Jahr 2000 wurde von der Friedrich Schiller Universität Jena eine Repräsentanzanalyse für die Bodendauerbeobachtungsflächen in Thüringen durchgeführt (ebd.). Damit sollte ein objektives Verfahren zur Standortauswahl etabliert werden. Ein weiteres Ziel war die Bestimmung potentieller Standorte zur Einrichtung neuer BDF, um eine möglichst hohe Flächenabdeckung zu erreichen. Die Analyse zeigte, dass die vorhandenen BDF-Flächen nur 41 % der Landesfläche Thüringens repräsentierten (TLUG 2006:18 f.). Als Konsequenz wurden zehn weitere Flächen, davon sieben unter Forstnutzung und drei Ackerflächen, eingerichtet. Wie in Abb. 2.2.2 erkennbar ist wurde somit ein Abdeckungsgrad für Thüringen von 77,5 % erreicht .

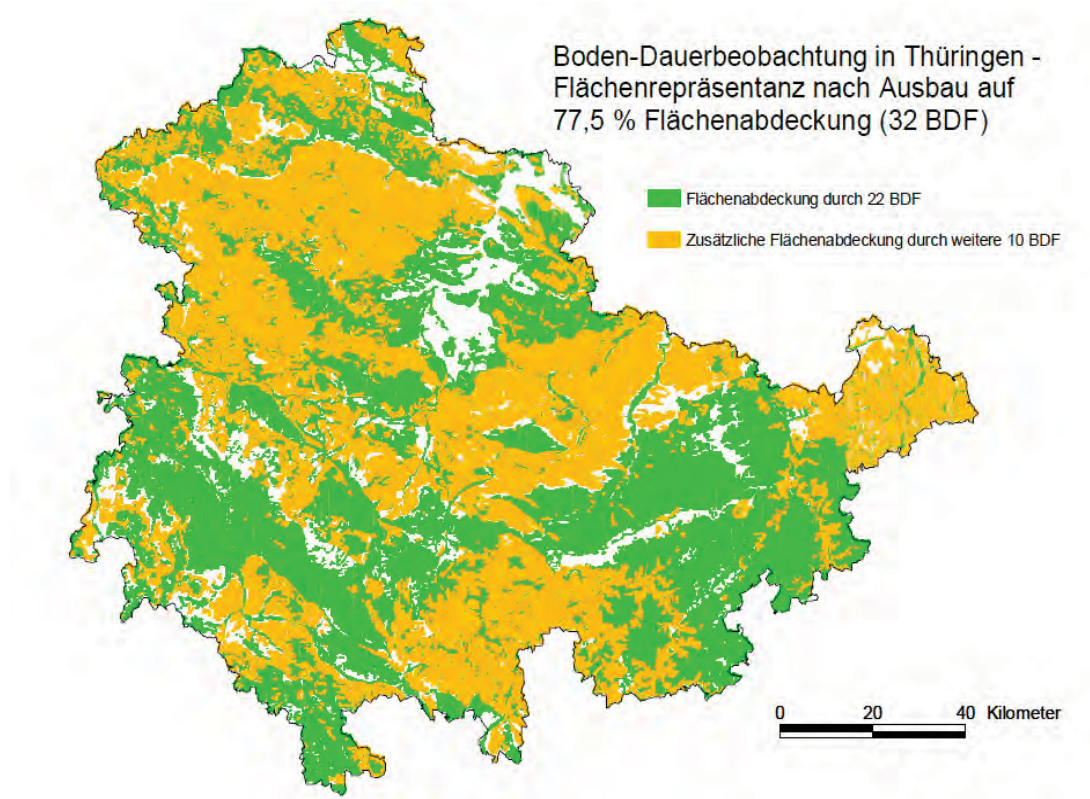


Abb.2.2.2 Grad der Flächenabdeckung Thüringens (TLUG 2006:19)

Für eine weitere Erhöhung des Abdeckungsgrades ist das Verhältnis von Kosten und Informationsgewinn zu beachten, da dieser mit jeder neu eingerichteten BDF nur noch sehr gering ist (TLUG 2006:20). Alle im Rahmen der Bodendauerbeobachtung gesammelten Daten werden gemäß § 6 ThürBodSchG in einem von der TLUG geführten Bodeninformationssystem vorgehalten.

2.3 Aufbau und Beprobung einer BDF

Nach BARTH et al. (2001:11) sollte eine Bodendauerbeobachtungsfläche in eine quadratische Kernfläche und eine diese umgebende Randfläche eingeteilt werden. Die Gesamtfläche richtet sich nach der Bodenvariabilität und sollte mindestens 1000 m² betragen (ebd.).

In Thüringen hat jede BDF eine Seitenlänge von 50 m und nimmt damit eine Fläche von 2500 m² ein (Abb. 2.3.1). Eine quadratische Kernfläche mit einer Seitenlänge von 30 m wird für zerstörungsfreie Probennahmen vorgehalten, wohingegen Aufgrabungen auf der Randfläche vorgenommen werden (GULLICH et al. 2008:25). Jede BDF wird in vier gleichgroße Teilflächen K1, K2, K3 und K4 unterteilt auf denen Beprobungen stattfinden. An den Eckpunkten sind Eisenplatten eingegraben, wodurch die Flächen detektiert werden können. Weiterhin wurden alle BDF mit einem differentiellen Global Positioning System eingemessen, was eine einfachere Methode zum Auffinden der Flächen darstellt. Alle in dieser Arbeit untersuchten landwirtschaftlich genutzten Flächen wurden auf Praxisschlägen angelegt (TLL 2006:8) und werden von Agrarunternehmen analog dem restlichen Feld bewirtschaftet.

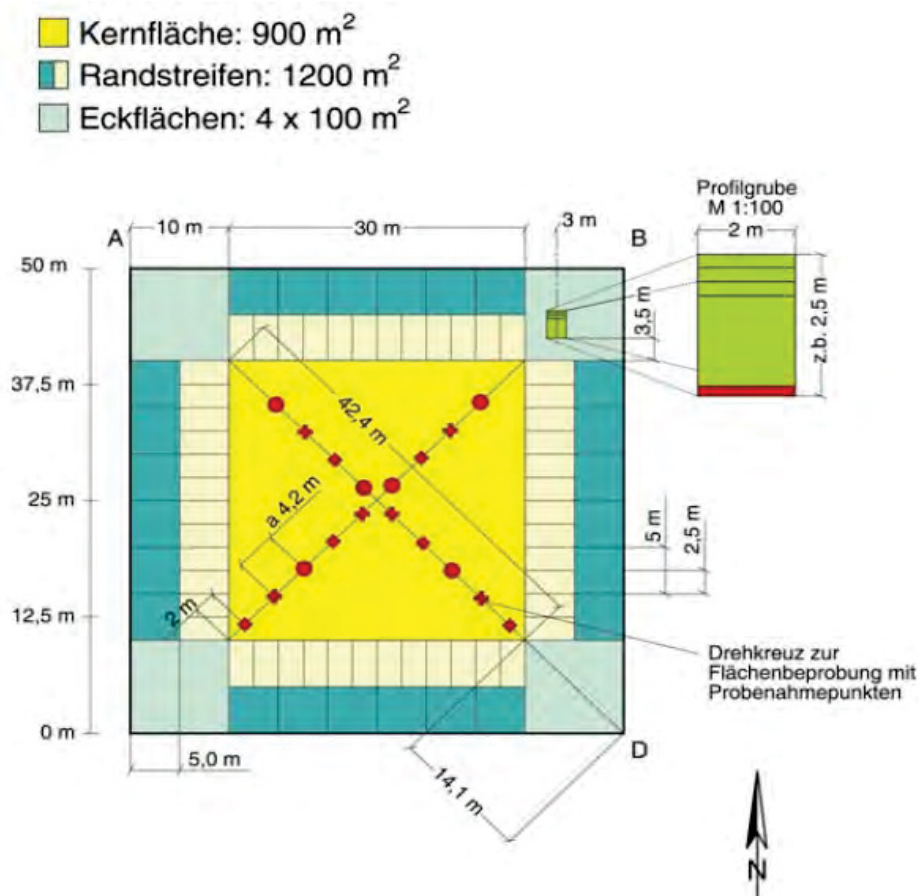


Abb. 2.3.1: Aufbau einer Bodendauerbeobachtungsfläche in Thüringen
(AG BD THÜRINGEN 2006:7)

Abhängig vom Beprobungsumfang wird in Basis BDF und Intensiv BDF unterschieden. Basis BDF dienen zur Merkmalsdokumentation, mit dem Ziel der langfristigen Erfassung von Bodenveränderungen (BARTH et al. 2001:9). Intensiv BDF dienen zur Merkmals- und Prozessdokumentation (ebd.). Neben einer langfristigen Erfassung der Bodenveränderungen sollen durch die Erfassung von Stoffflüssen auch deren Ursachen ausgemacht werden (ebd.). Dafür ist im Gegensatz zu den Basis BDF die dauerhafte Installation von Messgeräten im Boden erforderlich. Für die Beprobung der Flächen schlagen Barth et al. (2001:12) zum Einen „obligatorische Parameter“, wie beispielsweise pH-Wert, Corg-Gehalt, Karbonatgehalt, Nges, Königswasser extrahierbare Gehalte von Schwermetallen, zur Erzeugung eines Kerndatensatzes, mit dem die bundesweite Vergleichbarkeit der Ergebnisse sichergestellt werden soll, vor. Andererseits werden diese durch „empfohlene Parameter“, wie Redoxpotential, Leitfähigkeit, Totalgehalte von Schwermetallen, zur Beantwortungen individueller Fragestellungen der Bundesländer, ergänzt.

Das Zeitintervall zwischen den Beprobungen richtet sich nach der Stabilität der jeweiligen Parameter und muss so gewählt werden, dass eine Zerstörung der BDF vermieden wird (Barth et al. 2001:13). Dabei sollten labile Parameter (z.B. Stoffkonzentrationen in der gelösten Phase) jährlich, mesostabile Parameter (z.B. Gehalte an verfügbaren Nährstoffen) im Abstand von einem bis fünf Jahren und stabile Parameter (Gesamtstoffgehalte) nach mehr als fünf Jahren beprobt werden (ebd.). Bei allen Flächen erfolgte bei deren Einrichtung eine Grundinventur, um den aktuellen Zustand der Böden zu erfassen und durch spätere Wiederholungsbeprobungen Veränderungen des Bodens festzustellen (BARTH et al. 2001:16 f.). Mittels Schürfgruben wurde dazu eine vollständige Standortaufnahme mit Bodenansprache nach bodenkundlicher Kartieranleitung (KA 4), Dokumentation des Profils durch Fotos (siehe Kapitel 5.1) sowie die Entnahme von Bodenproben, vorgenommen (ebd.). Weiterhin wurden Nutzungsgeschichte sowie mögliche Belastungsfaktoren dokumentiert. Ein detailliertes Untersuchungsprogramm auf den landwirtschaftlichen BDF in Thüringen ist dem Anhang zu entnehmen.

3 Theoretische Vorbetrachtungen zu Schwermetallen in Böden

3.1 Definition und Eigenschaften

Zur Abgrenzung der Gruppe der Schwermetalle existiert keine eindeutige wissenschaftliche Definition. Die International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ermittelte in einer Studie mehr als 38 verschiedene Definitionen für diesen Begriff (ebd.). Danach kann sich die Zuordnung zu dieser Gruppe beispielsweise auf Dichte, Atomgewicht, Anzahl an chemischen Eigenschaften oder Toxizität beziehen (NICKEL INSTITUTE 2006:6). Die in der Literatur gebräuchlichste Definition umfasst Metalle mit einer Dichte größer 5 g/cm^3 . SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2010:459) definieren sie als „Metalle die sich mit einer Dichte von $> 3,5 \dots 5$ (in gediegenem Zustand) an die Leichtmetalle anschließen“. Wachsende Akzeptanz findet auch die Bezeichnung „potentiell toxische Elemente (PTE)“ (ALLOWAY 1999:1).

Schwermetalle sind im Gegensatz zu organischen Schadstoffen persistent, also weder biologisch noch chemisch abbaubar. Als weitere physikalische Eigenschaften weisen sie elektrische Leitfähigkeit, eine hohe Wärmeleitfähigkeit, einen festen Aggregatzustand bei Raumtemperatur (außer Quecksilber welches im flüssigen Zustand vorliegt) sowie starken metallischen Glanz, auf (HOLLEMAN et al.: 145 f.). Einige dieser Stoffe sind allgemein oder ab bestimmten Konzentrationen toxisch und gelten als Schadstoffe. Im Sinne der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung sind diese: „Stoffe und Zubereitungen, die auf Grund ihrer Gesundheitsschädlichkeit, ihrer Langlebigkeit oder Bioverfügbarkeit im Boden oder auf Grund anderer Eigenschaften und ihrer Konzentration geeignet sind, den Boden in seinen Funktionen zu schädigen oder sonstige Gefahren hervorzurufen“ (§2 Abs. 6 BBodSchV). Bestimmte Schwermetalle wie Eisen, Mangan, Chrom, Kupfer, Kobalt, Nickel und Zink (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:459) werden auch als Spurenelemente bzw. Spurennährstoffe bezeichnet, da sie essentieller Bestandteil der Pflanzenernährung sind. Dabei ist zu beachten, dass beispielsweise Eisen zwar aus biologischer, aber nicht aus geologischer Sicht ein Spurenelement ist (ALLOWAY 1999:1).

3.2 Pedogene Prozesse

In Abb. 3.3.1 sind die wichtigsten Ein- und Austragswege, bodeninternen Verlagerungsprozesse von Schwermetallen, sowie die Wechselwirkungen zwischen Boden und Pflanze dargestellt. Natürlicherweise werden diese hauptsächlich durch bodenbildende Prozesse, wie der Verwitterung von Gesteinen, Humifizierung, Lessivierung, freigesetzt und umverteilt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:463). Wichtigste Grundlage sind dabei Sedimentgesteine, welche 75 % der Ausgangsgesteine für die Bodenbildung darstellen (ALLOWAY 1999:41). Gebunden sind Schwermetalle überwiegend als Oxide, Sulfide und Carbonate, sowie eingeschlossen in die Gitterstruktur von Silikaten (HEINTZ 1996:233).

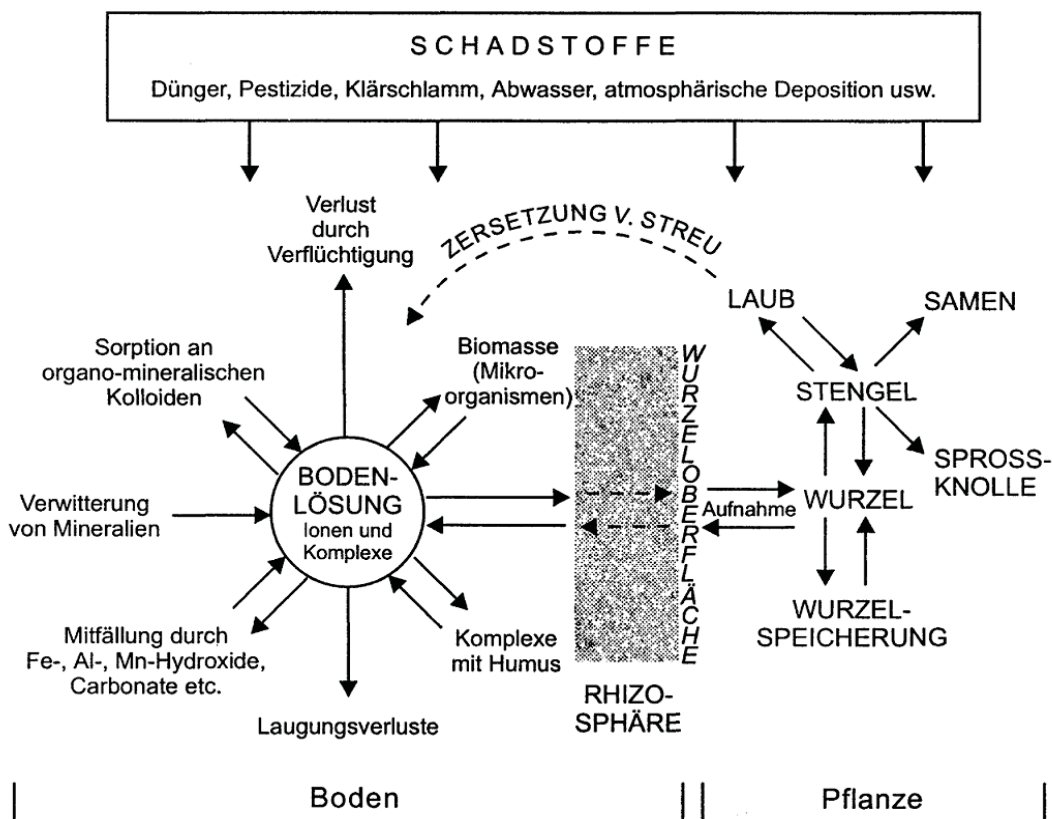


Abb. 3.3.1 Schwermetallodynamik in Böden sowie das System Boden-Pflanze (ALLOWAY 1999:29)

Der Hintergrundgehalt eines Bodens ergibt sich für die jeweiligen Schwermetalle überwiegend aus dem geogenen Grundgehalt, welcher Ausgangsmaterial und Umverteilung infolge von bodenbildenden Prozessen erfasst. Hinzu kommen, besonders in den oberen Bodenschichten, diffuse Stoffeinträge aus der Atmosphäre, welche sich nicht von dem geogenen Grundgehalt trennen lassen (HINDEL et al. 2004:1f.).

Nach Definition setzt sich der Hintergrundgehalt somit: „aus dem geogenen Grundgehalt und der ubiquitären Stoffverteilung als Folge diffuser Einträge in den Boden zusammen“ (HINDEL et al. 2004:2). Punktuelle Belastungsquellen wie Kontaminationen durch Erzbergbau, Industrieanlagen oder Altlasten zählen nicht zum Hintergrundgehalt (ebd.). Bodenschwermetallgehalte werden zu deren Bewertung mit den Hintergrundwerten, beispielsweise bei einer Überschreitung der Vorsorgewerte, abgeglichen. Eine weitere Quelle für Schwermetalle ist die atmosphärische Deposition. Dabei gelangen die Stoffe, überwiegend anthropogener Herkunft, aus Verbrennungs- und Produktionsprozessen, aber auch natürlich, beispielsweise durch Vulkanausbrüche, in die Troposphäre. Die in dieser Schicht gasförmig, gelöst oder an Partikel gebundenen Stoffe können anschließend in Form von trockener Deposition, durch Anhaften fester Partikel $<10\text{ }\mu\text{m}$ (Feinstäube, Aerosole) auf Oberflächen (Nadeln) oder mittels nasser Deposition, durch wässrige Niederschläge, eingetragen werden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:451). Das Anhaften von Nebel oder Tau an Vegetation führt, besonders in Waldgebieten, zur feuchten Deposition (ebd.). In diesem Zusammenhang wird auch vom Auskämmeffekt der Wälder gesprochen. Infolge von Stammabfluss kann es zu einer lokalen Anreicherung von Schadstoffen kommen. In Tab. 3.3.1 ist erkennbar, dass die atmosphärischen Einträge in ländlichen- und Waldgebieten wesentlich geringer sind als in Industrie- und Ballungsgebieten. Besonders deutlich wird dies an den Beispielen von Kupfer und Blei, wo die jährlichen Einträge in Ballungsgebieten jene in ländlichen Gebieten um das hundertfache bzw. Zink um ein zehnfaches, übersteigen.

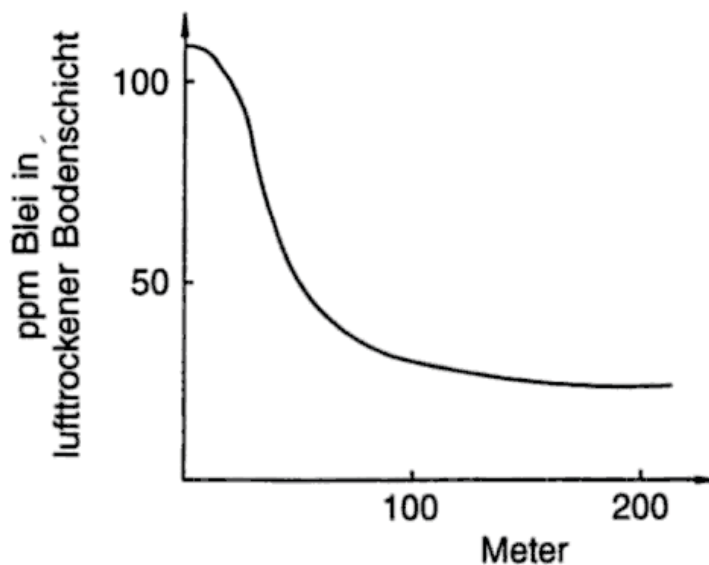


Abb. 3.3.2: Bleigehalte im Boden in Abhängigkeit des Abstandes vom Autobahnrand (HEINTZ 1996:243)

Abb. 3.3.2 zeigt als Beispiel für die atmosphärische Deposition die Abhängigkeit der Bleigehalte im Boden von der Entfernung zur Autobahn. Darin wird deutlich, dass die Konzentration in unmittelbarer Nähe der Autobahn höher als 100 ppm (mg/kg) ist. ALLOWAY definiert hingegen für unbelastete Böden einen Wert von unter 20 mg/kg (1999:131).

Insbesondere durch landwirtschaftliche Nutzung von Flächen findet weiterer anthropogener Eintrag statt. Durch Anwendung von Mineral- und Wirtschaftsdüngern (Mist, Gülle), Klärschlämmen, sowie von Pflanzenschutzmitteln (vor allem Kupfer im Wein und Hopfenanbau), gelangen weitere Schwermetalle in die Böden. Tab. 3.3.1 gibt einen Überblick über die durchschnittlichen Schwermetalleinträge pro Jahr durch diese Stoffe.

Tab. 3.3.1: *Natürliche und anthropogene Eintragsquellen für einige Schwermetalle in [g ha⁻¹ a⁻¹](SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:461)*

Element	Atmosphärische Einträge		Direkteinträge				
	Ländl. Gebiete/ Waldstandorte	Industrie-/ Ballungsgebiete	Verwitterung	Klär- schlamm ¹	Kompost ¹	Wirtschafts- dünger ^{2,3}	Mineralischer Dünger ^{2,4}
As	3	k.A.	k.A.	0,12	k.A.	k.A.	k.A.
Cd	1,5...3	≤ 35	0,1	2,21	4,7	0,33...0,61	0,15...2,98
Cr	3	k.A.	2,0	61	253	6,11...33,8	15,3...464
Cu	11...13	1526	3,5	520	577	73,1...454	2,89...9,5
Ni	5...35	k.A.	0,8	43,5	163	8,93...13,6	1,50...6,63
Hg	0,2...0,8	2	k.A.	1,17	1,6	0,02...0,13	0,00...0,3
Pb	31...310	270...14.000	0,8	76	464	5,14...16,7	0,24...4,93
Zn	70...618	bis 4000	2,3	1253	2037	467...1077	36,9...54,3

¹ Berechnete Werte aus maximalen Frachtraten nach Klärschlamm- und Bioabfallverordnung (1,5 t ha⁻¹a⁻¹ bzw. 10 t ha⁻¹a⁻¹) und durchschnittlichen Gehalten nach Tabelle 10.4-2

² Schwermetalleinträge durch Düngung von 50 kg P₂O₅ ha⁻¹a⁻¹;

³ Wirtschaftsdünger = Rinder-, Schweinegülle, Geflügelkot, Festmist Schwein und Rind;

⁴ Mineraldünger = Triplesuperphosphat, Röhphosphate, min. NPK-, NP-, PK-Dünger, Thomaskali.

⁵ wet only Daten von 2000; k.A. = keine Angabe

Klärschlämme stellen dabei eine wichtige Quelle für die damit behandelten Böden dar. Neben den Spurennährstoffen Zink und Kupfer, welche beispielsweise aus Hautpflegemitteln und anderen Haushaltsprodukten stammen, werden auch größere Mengen an Cadmium, Blei und Quecksilber eingetragen. Bei mineralischen Düngern ist die Cadmiumbelastung in Phosphordüngern sowie die Emissionen bei deren Herstellung problematisch. Dabei ist der Gehalt der Verunreinigung stark von der Herkunft des Phosphors abhängig. Düngemittel aus Marokko und anderen nordafrikanischen Ländern sind oft stärker belastet als relativ

cadmiumarme Dünger aus Russland (EURACTIV 2011:o.S.). Mit Wirtschaftsdüngern, besonders durch Ausbringen von Schweinegülle und Schweinemist, gelangen große Mengen Zink und Kupfer in die Böden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:460). Es bleibt festzustellen, dass der größere Anteil der Schwermetalleinträge anthropogen verursacht ist. Eine Ausnahme bildet Quecksilber, wo jeweils die Hälfte natürlich und anthropogen eingetragen wird (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:459). Die Aufnahme von Schwermetallen durch Pflanzen und Mikroorganismen erfolgt hauptsächlich aus der Bodenlösung. Inwiefern diese in ionisierter Form mobil sind und welche Anteile als wenig lösliche Verbindungen vorliegen, ist von physikalisch chemischen Wechselwirkungen mit der Bodenmatrix, insbesondere der organischen Substanz, den Tonmineralen und Oxiden, abhängig (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:463). Redoxpotential, organische und anorganische Komplexbildner sowie Mikroorganismen und Bindungsformen der Schwermetalle beeinflussen und der pH-Wert charakterisiert die Bodenreaktion (ebd.). Die positiv geladenen Schwermetallkationen können reversibel an die negativen Oberflächenladungen organischer und anorganischer Bodenbestandteile angelagert werden. Diese Adsorption ist selektiv und findet in folgender Reihung statt:



Somit ist Cadmium von den genannten Schwermetallen am wenigsten an die Bodenteilchen gebunden und in mobiler Form vorhanden, sodass es leichter von Pflanzen aufgenommen werden kann. Blei hingegen wird in größerem Maß adsorbiert und ist somit weniger mobil. Ein weiterer wesentlicher Faktor für die Mobilisierung von Schwermetallen ist das Redoxpotential von Böden. In Folge von Stauwassereinfluss, wie diese bei Gleyen und Pseudogleyen der Fall sind, kommt es zum Sauerstoffmangel. Unter diesen anaeroben Bedingungen setzen Mikroorganismen organische Substanzen um. Dabei kommt es zur Freisetzung von Elektronen, die wiederum zu einer Reduktion von Eisen und Mangan und somit zur Auflösung von Oxiden und Hydroxiden führt. Die daran adsorbierten Schwermetalle werden durch diesen Prozess freigesetzt und werden pflanzenverfügbar (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:167).

Allgemein kann gesagt werden, dass mit sinkendem pH-Wert die Löslichkeit und somit auch die Bioverfügbarkeit von Schwermetallen zunimmt (ALLOWAY 1999:13). In Abb. 3.3.3 ist der Anteil der Blei- und Cadmiumverbindungen in der Bodenlösung in Abhängigkeit vom pH

Wert dargestellt. Darin ist erkennbar, dass ab einem pH-Wert von 7 ca. 85 % als besonders pflanzenverfügbares Cd^{2+} vorliegt, während dies bei Pb^{2+} erst ab pH 5 bis pH 6 der Fall ist. Im alkalischen Bereich überwiegen dagegen schlecht wasserlösliche und somit wenig pflanzenverfügbare Karbonatverbindungen, bzw. Hydroxidverbindungen, welche als organische Komplexe gebunden werden.

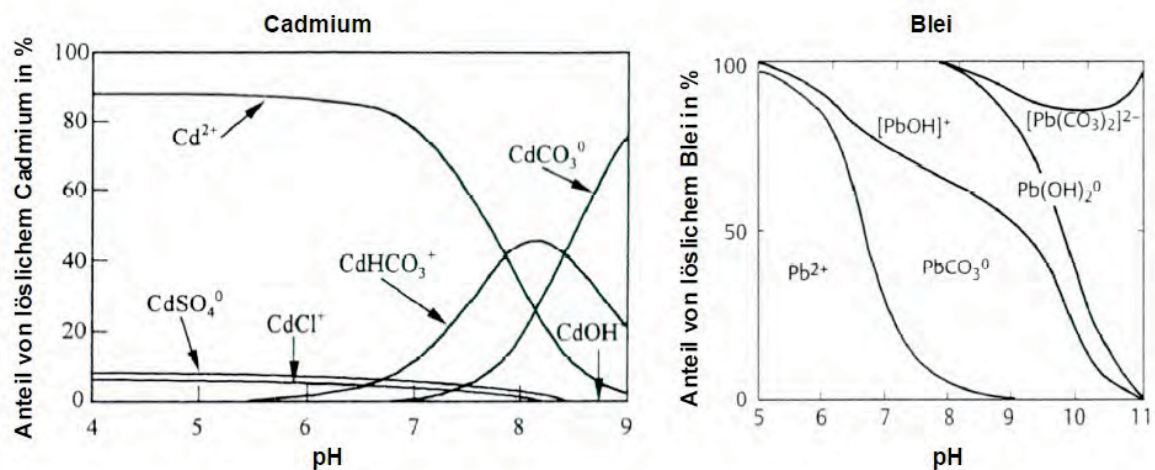


Abb. 3.3.3: Verbindungen von Blei und Cadmium in der Bodenlösung in Abhängigkeit vom pH Wert in Kalkböden bei 25 °C (ZEHL 2003:9)

Im Gestein gebundene Schwermetalle sind wenig mobil, und somit nur in geringem Maß pflanzenverfügbar. Dagegen sind anthropogen als Oxide oder Sulfate bzw. organische Schwermetallkomplexe eingetragene Schwermetalle zunächst mobil und somit auch gut pflanzenverfügbar, bevor sie langfristig durch pedogene Prozesse immobilisiert werden (KUNTZE et al. 1991:4). Eine weitere Form der Immobilisierung ist die Ausfällung in Verbindung mit anderen Bodenbestandteilen (ALLOWAY 1999:22). In Abb. 3.3.1 ist erkennbar, dass die Aufnahme von Schwermetallen neben den Wurzeln auch über die Spaltöffnungen der Blätter bzw. anderen oberirdischen Pflanzenteilen erfolgt. Diese Form der Aufnahme ist insbesondere für die im Boden weniger mobilen Schadstoffe, wie Blei, von Bedeutung.

Schwermetallaustrag findet auf landwirtschaftlichen Böden durch Ernteentzug, Auswaschung (Laugungsverluste) und Verflüchtigung statt. Weiterhin können Schwermetalle über lange Zeiträume in die Kristallgitter von Oxiden und Tonmineralen irreversibel eindiffundieren (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:463 f.).

3.3 Wirkung auf Mensch und Umwelt

Einige Schwermetalle wie Mangan, Eisen, Kupfer und Zink für Pflanzen und Lebewesen essentiell. Sie sind im menschlichen Körper in Hormonen, unter anderem Insulin, vielen Enzymen und weiteren Verbindungen, wie Hämoglobin, enthalten (FIEDLER & RÖSLER 1987:18). Als Spurennährelemente, Mikronährstoffe oder Mikronährelemente sind sie für die Pflanzenernährung in geringen Mengen von hoher Bedeutung (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:430). Eine Unterversorgung kann zu erheblichen Wachstumsdepressionen und Ertragseinbußen in der Landwirtschaft führen. So führt Kupfermangel bei Pflanzen zu Chlorosen und Verkümmern der Spitzentriebe. Zinkmangel hat ein verringertes Pflanzenwachstum und Kleinblättrigkeit zur Folge. Andererseits wirkt ein Überangebot dieser Elemente toxisch bei Pflanzen und wenigen Tieren, wie beispielsweise ein zu hoher Kupfergehalt bei Schafen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:430). Sehr hohe Gehalte an Zink schädigen zudem Mikroorganismen. Andere Elemente wie Blei, Cadmium und Quecksilber sind ohne jegliche physiologische Bedeutung und wirken schon in geringen Konzentrationen toxisch. Cadmium wird hauptsächlich über Nahrungsmittel (25 bis 75 µg/Tag) aber auch durch Rauchen (20 bis 35 µg/Tag) aufgenommen (ALLOWAY 1999:151). WHO und FAO quantifizieren die maximal tolerierbare tägliche Dosis mit 70 µg/Tag (ebd.). Cadmium reichert sich über lange Zeiträume in den Nieren an und führt bei hohen Konzentrationen zu Funktionsstörungen. Quecksilber und seine Verbindungen gehören zu den Stoffen mit der höchsten Toxizität und können zu irreversiblen Schädigungen des Nervensystems führen (ALLOWAY 1999:267). Die Bioverfügbarkeit für die Pflanzen ist jedoch gering und die Wurzeln wirken als Barriere, sodass Quecksilber nur in geringen Mengen in die oberirdischen Pflanzenteile gelangt (ALLOWAY 1999:277). Wesentlich größere Mengen als durch landwirtschaftliche Erzeugnisse werden über den Verzehr von Fischen und anderen Meerestieren aufgenommen (ALLOWAY 1999:267). Problematisch ist die stark toxische Wirkung auf die Bodenatmung, welche stark von den jeweiligen Bodeneigenschaften abhängig ist (ebd.). Blei birgt insbesondere für Kleinkinder schon durch die Anreicherung kleinerer Mengen große Gefahren und kann zu geistigen Behinderungen führen (ALLOWAY 1999:131). Die Verweilzeiten von Blei sind im Gegensatz zu anderen Schwermetallen allerdings sehr groß, wodurch es zu einer Ansammlung in den Böden kommt (ALLOWAY 1999:135).

3.4 Das Critical Loads Konzept

Als Critical Loads werden ökologische Belastungsgrenzwerte bezeichnet, bei deren Unterschreitung nach aktuellem Forschungsstand keine langfristigen Schadenswirkungen auftreten (UBA 2013:o.S.). Dabei darf der langfristige Eintrag an Schadstoffen pro Fläche und Zeit nur so hoch sein, wie diese vom Ökosystem gepuffert, gespeichert aufgenommen oder in unbedenklicher Größe ausgetragen werden können (GAUGER et al. 2008:14). Die Berechnung erfolgt auf Grundlage einer Massenbilanz, bei der Ein- und Austräge von Schadstoffen in ein Ökosystem abgeschätzt werden (ebd.). Abb. 3.4.1 zeigt eine solche, allerdings stark vereinfachte Bilanz. Die Berechnung erfolgt in dieser Darstellung aus dem Eintrag durch die Verwitterung der Gesteine und dem Austrag über den Entzug der Biomasse/Vegetation sowie durch den Wasserabfluss. In einer weiteren Darstellung wird zusätzlich eine tolerierbare Akkumulation im Boden berücksichtigt. Keinerlei Beachtung finden in dieser vereinfachten Darstellung beispielsweise anthropogene Einträge aus der Landwirtschaft und die atmosphärische Deposition.

Kartiert wurden Critical Loads in Deutschland unter anderem für Säureeinträge und eutrophierenden Stickstoff. Im Zusammenhang mit Schwermetallen wurden diese für die Wirkung von Cadmium, Blei und Quecksilber zum Schutz der menschlichen Gesundheit (Trinkwasserschutz) und von Ökosystemen ermittelt. Bei Schwermetallen werden neben den natürlichen auch anthropogene, bewirtschaftungsbedingte Eintragsfaktoren berücksichtigt. Ziel dieses Konzeptes ist es, beispielsweise durch den Vergleich mit Daten zur Luftbelastung, Regionen mit erhöhtem Risiko zu ermitteln und in diesen gegebenenfalls Maßnahmen zu ergreifen um Ökosysteme langfristig zu stabilisieren.

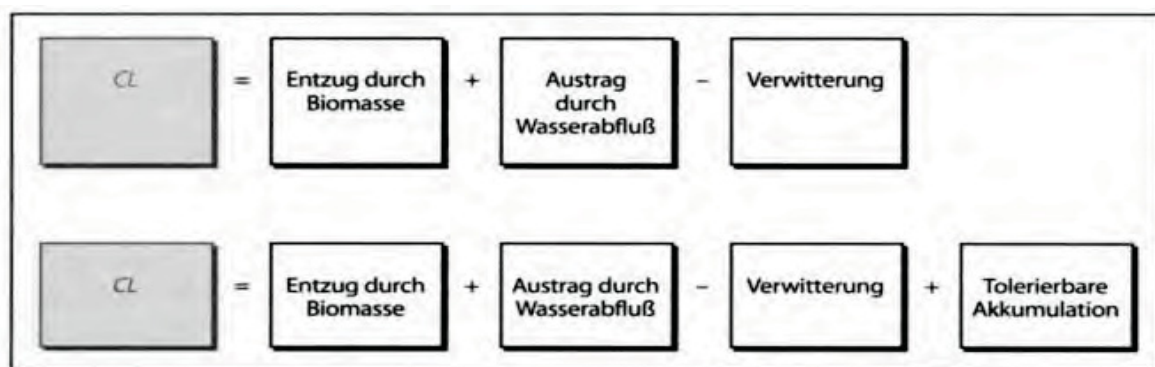


Abb. 3.4.1: Vereinfachtes Konzept der Critical Loads (NAGEL & GREGOR 1999:117)

Abb. 3.4.2 zeigt die Critical Loads für Blei in Deutschland zum Schutz von terrestrischen Ökosystemen. Darin ist erkennbar, dass der tolerierbare Eintrag in Ökosysteme auf über 70 % der Flächen zwischen 10 g ha⁻¹ a⁻¹ und 30 g ha⁻¹ a⁻¹, liegt. Allerdings sind auf 6,15 % der Landesfläche Deutschlands, insbesondere im Bereich der Kammlagen der deutschen Mittelgebirge wie Harz, Rheinisches Schiefergebirge, Thüringer Wald, Schwarzwald, Bayerischer Wald und Erzgebirge, Werte der höchsten Klasse von mehr als 150 g ha⁻¹ a⁻¹, feststellbar. Beeinflusst werden diese Werte insbesondere durch Bodeneigenschaften, Landnutzung und den Bodenwasserabflüssen aus dem A-Horizont (GAUGER et al. 2008:85 f.). Landwirtschaftliche Flächen weisen mit durchschnittlich 22,6 g ha⁻¹ a⁻¹ einen geringeren tolerierbaren Eintrag auf als Nadelwald (93,9 g ha⁻¹ a⁻¹), Laubwald (47,8 g ha⁻¹ a⁻¹) und naturnahe waldfreie Ökosysteme (56,4 g ha⁻¹ a⁻¹) (ebd.). Die hohen Werte in den Mittelgebirgen sind auf hohe Abflussraten in diesen Gebieten bedingt durch Relief und höhere Niederschläge, sowie die Nutzung als Nadelforst zurückzuführen.

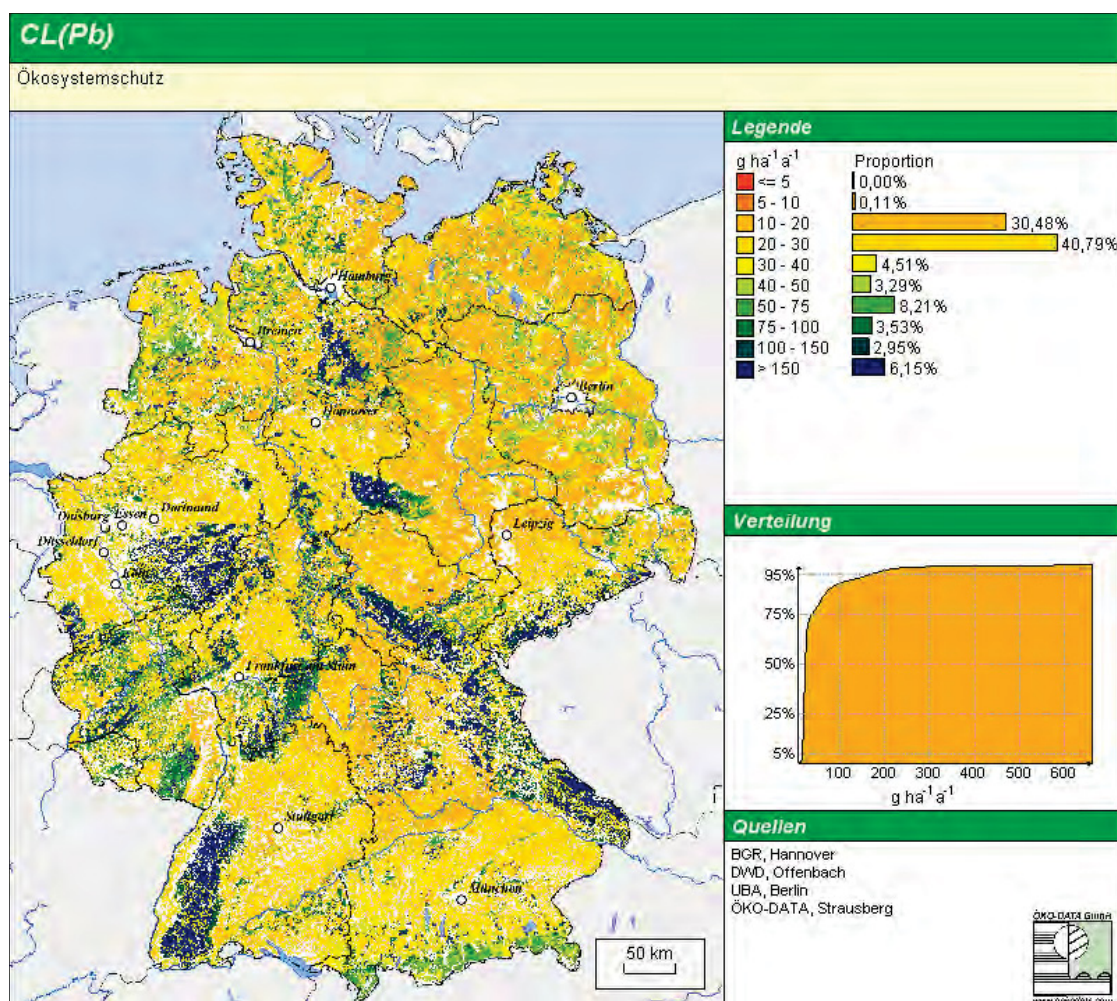


Abb. 3.4.2: Critical Loads zum Ökosystemschutz für Blei in Deutschland (GAUGER et al. 2008:86)

4 Material und Methoden

4.1 Standortauswahl und Beschreibung

Insgesamt wurden in dieser Arbeit die Datensätze von vier im Jahr 1992 eingerichteten Bodendauerbeobachtungsflächen ausgewertet. Alle Flächen sind Basis-BDF, von denen sich drei Standorte unter Ackernutzung und ein Grünlandstandort befinden. Die Standorte wurden so gewählt, dass die Flächen einen Beobachtungszeitraum von 20 Jahren aufweisen und somit jeweils fünf Messkampagnen der Schwermetallgehalte aus den Jahren 1993, 1997, 2002, 2007 und 2012 vorhanden sind. Die Profilansprachen wurden bis in 90 cm Tiefe durchgeführt, da die Beprobungen zur Bodenchemie bis in diese Tiefe reichen.

Die erste analysierte Fläche ist Großobringen 2 (BDF 3) und liegt ca. 7,5 km nördlich von Weimar, nahe Buttstedt. Der Standort ist auf einer Höhe von 237,5 m über NN gelegen, die mittlere Jahrestemperatur beträgt 8,4 °C und die mittlere Niederschlagshöhe 556 mm/a. Die Fläche ist ein schwach geneigter Südost exponierter Hang und wird von der Thüringer Lehr-Prüf und Versuchsgut Buttstedt landwirtschaftlich bewirtschaftet. Der A- Horizont reicht bis in eine Tiefe von 65 cm und gliedert sich in einen 25 cm mächtigen, mittel humosen Ap- Horizont, einen 18 cm Mächtigen, stark humosen A_{sh}- Horizont sowie einen 22 cm mächtigen, schwach humosen A_{sh}-B_v- Horizont. Der A- Horizont ist bei einem pH Wert von ca. 6,5 skelett und carbonatfrei, enthält Löß und besitzt eine geringe Lagerungsdichte. Der sich anschließende elC_{kc}- Horizont reicht bis in eine Tiefe von 110 cm ist carbonatreich in Form von Lößkindeln und Kalkpseudomycelien, skelettfrei und besitzt eine hohe Lagerungsdichte. Der pH Wert steigt auf ca. 7,5. Die Bodenart ist über das gesamte Profil schluffiger Lehm (Lu), wobei sich die Korngrößenverteilung bis in eine Tiefe von 51 cm aus ca. 17 % Sand, 55 % Schluff und 28 % Ton zusammensetzt. In den tieferen Horizonten nimmt die Sandfraktion auf ca. 30 % zu, Schluff auf ca. 50 % und Ton auf 20 % ab. Der Bodentyp kann als Braunerde-Tschernosem auf Löß angesprochen werden.

BDF 9 (Wöhlsdorf 1) liegt ca. 6 km südöstlich von Triptis und ca. 2 km östlich von Auma, ist 398,5 m ü. NN gelegen und ein schwach geneigter, Südost exponierter, gestreckter Hang. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 7,5 °C, die mittlere Niederschlagshöhe 637 mm/a. Das Bodenprofil gliedert sich in einen 30 cm mächtigen, mittel humosen Ap- Horizont sowie einen 35 cm mächtigen, mittel humosen Sw- und einen 15 cm mächtigen, sehr schwach humosen II S_d- Horizont. Die Bodenart entwickelt sich von einem schluffigen Lehm über einen mittel tonigen Schluff hin zu einem schluffig lehmigen Sand. Weitere Merkmale sind

Eisenfleckigkeit im ersten und zweiten, starke Bleichung im zweiten sowie Rostfleckigkeit im dritten Horizont. Der Standort ist ein Norm Pseudogley auf Schiefergestein.

BDF 10 (Wöhlsdorf 2) ist lediglich ca. 2,5 km von BDF 9 entfernt und auf einer Höhe von 425 m über NN gelegen. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 7,8 °C und die mittlere Niederschlagshöhe 647 mm. Auch dieser gestreckte Hang ist Südost exponiert und schwach geneigt. Beide Ackerstandorte (BDF 9 und BDF 10) werden von der ERVEMA agrar Gesellschaft Wöhlsdorf mbH bewirtschaftet. Das Profil gliedert sich in einen 30 cm mächtigen, mittel humosen Ap- Horizont, an den sich ein 50 cm mächtiger, schwach humoser, stark gebleichter, eisenfleckiger Sw-M- Horizont anschließt. Darauf folgt bis in eine Tiefe von 100 cm ein stark gebleichter, eisenfleckiger II Sw-Horizont. Die Bodenart ist bis in eine Tiefe von 100 cm ein sandig lehmiger Schluff (Uls). Der Standort kann als Kolluvisol Pseudogley auf Schiefergestein angesprochen werden.

Der letzte untersuchte Standort (BDF 11 Oberweißbach 1) befindet sich ca. 3 km südwestlich von Oberweißbach. Die Höhe des Standorts beträgt 757 m über NN. Die Jahresmitteltemperatur liegt bei 6 °C bei einer Niederschlagshöhe von 979 mm. Die BDF befindet sich auf einem mittel geneigten Nordost exponierten Hang. Die Nutzung ist Schnittnutzung im ersten Aufwuchs, kombiniert mit extensiver Weidewirtschaft auf Dauergrünland. Auf einen 25 cm mächtigen, mittel humosen Ap- Horizont folgt bis in eine Tiefe von 50 cm der Bv- Horizont. Daran schließen sich bis in eine Tiefe von 65 cm ein Bv- Cv- Horizont und bis in eine Tiefe von 90 cm ein II ICv- Horizont an. Alle Horizonte enthalten zwischen 50 % und 80 Vol. % Skelettanteil, überwiegend in Form von Tonschiefer. Die Bodenart entwickelt sich von einem sandig-lehmigen Schluff (Uls) in den ersten drei Horizonten zu einem mittel schluffigem Sand (Su3) im vierten Horizont. Der Bodentyp ist eine Braunerde auf Schiefer als Ausgangsgestein. Weitere Bodenkenndaten zu den jeweiligen Standorten sind dem Anhang zu entnehmen.

Mit Anlage der Flächen in den 1990er Jahren wurde der aktuelle Zustand der Flächen dokumentiert, wobei die einmalige Bestimmung der geogenen Gehalte ein Bestandteil war. Dafür wurde pro BDF auf den Teilflächen K1 und K3 aus den jeweiligen Tiefenstufen Material entnommen und der Skelettanteil mit einer Korngröße von größer 2 mm vom Feinboden abgetrennt und analysiert.

4.3 Probenvorbereitung und Messverfahren

Die Bestimmung der Konzentrationen der jeweiligen Elemente aus diesen Proben erfolgt in den Laboren der Abteilung „Untersuchungswesen“ der TLL. Schwermetalle werden, der Fragestellung entsprechend, durch verschiedene Verfahren aufgeschlossen. Mit Hilfe eines Gesamtaufschlusses (Totalaufschluss), bestehend aus einem HNO_3/HF (früher $\text{HNO}_3/\text{HF}/\text{HClO}_4$)- Säuregemisch in geschlossenen PTFE-Gefäßen (Picotrace) nach HAUSVERFAHREN, werden alle Elemente in Lösung gebracht und außer Quecksilber, welches nach diesem Verfahren nicht bestimmt wird, mit einem ICP-MS Elan 6000 (früher Elan 5000) der Firma PERKIN ELMAR Waltham, Massachusetts, USA, nach DIN EN ISO 17294-2:2005-02 quantifiziert.

Als ein weiteres Verfahren wird ein Königswasseraufschluss (nach DIN ISO 11466:1997-06) mit einer BEHR-Apparatur von BEHR Labor-Technik GmbH Düsseldorf durchgeführt. Dabei werden im Gegensatz zum Totalaufschluss die Schwermetalle nicht vollständig in Lösung gebracht. Da beispielsweise Silikate nicht aufgelöst und die darin enthaltenen Schwermetalle freigesetzt werden, beträgt der durch Königswasser extrahierte Gehalt am Gesamtgehalt im Durchschnitt für Cadmium 91 %, Blei 78 %, Zink 91 % und Kupfer 95 % (SCHÖNBUCHNER 2002:14). Aufgrund der im Vergleich zum Totalaufschluss einfacheren Handhabbarkeit werden durch dieses Verfahren oft die Gesamtschwermetallgehalte bestimmt (ebd.). Dieser Aufschluss bildet auch den methodischen Schwerpunkt der nachfolgenden Ergebnisse. Aus dem Königswasseraufschluss werden Cadmium mit einem Graphitrohr-ASS AANALYST 300 der Firma PERKIN ELMAR nach E DIN ISO 11047:1995-06 VERF.B, Quecksilber mit einem Kaltdampf ASS FIMS 100 von PERKIN ELMAR nach DIN EN 1483:1997-05 (alte Methode) sowie Zink, Kupfer und Blei mittels Flammen-AAS AANALYST 300 von PERKIN ELMAR nach E DIN ISO 11047:1995-06 VERF.A. bzw. seit den 2000er Jahren nach DIN EN ISO 11885:1998-04 mit einem ICP-OES ICAP 6000 von THERMO FISHER Waltham, Massachusetts, USA (früher: OPTIMA 3000 der Firma PERKIN ELMAR) extrahiert und analysiert. Nach neuer Methode wird Quecksilber nicht

mehr aufgeschlossen, sondern direkt mit einem Feststoffanalysator DMA 80 der Firma MLS, Leutkirch, Deutschland, bestimmt. Nach diesem Aufschlussverfahren findet die Einordnung der Vorsorgewerte statt.

Um die ökologische Wirkung von Schwermetallen zu beurteilen, ist es notwendig die pflanzenverfügbaren Anteile zu bestimmen. Im Rahmen der Bodendauerbeobachtung finden dabei zwei Verfahren Anwendung. Mit einem Ammoniumnitataufschluss werden die Proben durch Membranfiltration unter Verwendung von 1 M Ammoniumnitratlösung nach DIN 19730:1995-10 aufgeschlossen. Alle in dieser Arbeit betrachteten Elemente werden nun mit dem ICP-MS nach DIN EN ISO 17294-2:2005-02 (früher: DIN 38406-E29:1999-05) bestimmt. Die Bewertung der durch dieses Verfahren, bzw. durch Königswasserextraktion, ermittelten Gehalte erfolgt anschließend nach den Prüf- und Maßnahmenwerten der BBodSchV. Ein weiteres Verfahren stellt die Bestimmung der pflanzenverfügbaren Mikronährstoffe (Zink und Kupfer) nach klassischer Methode dar. Auf Grundlage dieser Ergebnisse werden anschließend gegebenenfalls Düngeempfehlungen ausgesprochen. Kupfer wird mit Salpetersäure extrahiert und nach TGL 25418/14 nach WESTERHOFF/KRÄHMER/WITTER mittels F-AAS gemessen. Der Zinkgehalt wird im Auszug mit EDTA/Ammoniumcarbonat mit dem F-AAS nach MB VDLUFA BD.IA7.5.1 ermittelt. Für jede Probe wird eine Doppelbestimmung durchgeführt, wobei das Messergebnis der Blindwert korrigierte Mittelwert dieser beiden Bestimmungen ist.

4.4 Datenauswertung und Fehlerquellen

Die Haltung der aufgenommenen Daten des Bodendauerbeobachtungsprogramms der TLL erfolgt in einer Accessdatenbank. Aus der Datenbank wurde im Rahmen dieser Arbeit eine flexible Excelanwendung zur auswertungsstatistischen und graphischen Darstellung erstellt. Diese ermöglicht weiterhin eine einfache Regressionsanalyse zur Ermittlung von Trends sowie einen Vergleich der unterschiedlichen Analysemethoden. Mit der Anwendung wurden zahlreiche Tabellen und Grafiken für diesen Bericht erstellt.

Zur Auswertung der Hintergrundgehalte der untersuchten Flächen wurde jeweils der Mittelwert für jede Tiefe aus dem Laborergebnis der Teilflächen K1 und K3 gebildet. Auf BDF 3 waren keine auswertbaren Daten von Teilfläche K1 für die erste Tiefe vorhanden, sodass hier lediglich der Wert von Teilfläche K3 einbezogen wurde. Bei BDF 11 (Grünland) wurden in allen Darstellungen dieser Arbeit Tiefenstufe 1 (0 bis 10 cm) und Tiefenstufe 2 (10 bis 20 cm) zur neuen Tiefe 1 (0 bis 20 cm) unter Mittelwertbildung zusammengefasst, um

die Vergleichbarkeit mit den drei Acker BDF zu gewährleisten.

Für die Darstellung der Schwermetallgehalte wurde jeweils aus den vier Messwerten der Teilflächen K1, K2, K3 und K4 der Mittelwert gebildet und grafisch dargestellt. Um die Streuung der Einzelwerte der Teilflächen um den Mittelwert zu quantifizieren, wurden jeweils die Fehlerbalken auf Grundlage der Standardabweichung eingefügt. Weiterhin wurde der Vorsorgewert für Böden (Bodenart der untersuchten BDF= Lehm/Schluff) für das jeweilige Schwermetall auf Grundlage der BBodSchV (nach Anhang 2) dargestellt.

Die Darstellungen zur Abhängigkeit der Schwermetallgehalte von pH-Wert und Corg-Gehalt beruhen auf den Einzelwerten der Teilflächen, wogegen für den Tongehalt ein Messwert pro BDF für jeden Horizont vorhanden war. Unter Mittelwertbildung wurden diese Horizonte zu den Tiefenstufen eins, zwei und drei zusammengefasst. Dabei ist zu beachten, dass die Messung von pH-Wert und Corg-Gehalt jeweils zusammen mit der Messung der Schwermetallgehalte im fünf Jahresrhythmus durchgeführt wird, während der Tongehalt nur bei der Erstbeprobung bestimmt wurde.

Bei Analyse und Interpretation der Daten ist zu beachten, dass Böden dynamische Systeme sind und kurzfristigen Schwankungen, wie pH-Wert, Feuchtigkeitsstatus, Redoxbedingungen sowie Anbauverfahren und Umweltbedingungen, unterliegen (ALLOWAY 1999:11). Bei der Probenahme entsteht der größte Fehler. Nach LEWANDOWSKI et al. (1997:30) zählen dazu die Entnahme keiner repräsentativen Analyseprobe, eine Kontamination durch Fremdmaterial und Stoffverluste durch das Verdunsten leicht flüchtiger Verbindungen. Im Zusammenhang mit Schwermetallen ist letztgenanntes allerdings nur von untergeordneter Bedeutung. Um diesen Fehler zu minimieren, werden Mischproben angefertigt, das Probenmaterial in Kunststofftüten verpackt sowie sachgerecht transportiert und gelagert. Eine Veränderung der Proben bei Transport und Lagerung ist im Hinblick auf die Schwermetalle eher unwahrscheinlich. Der Gerätefehler wird durchschnittlich mit kleiner 1,5 % angegeben.

5 Ergebnisse

5.1 Geogene Gehalte aus dem Totalaufschluss

Die Bestimmung der Gesamtgehalte erfolgte nach dem Verfahren der „gemahlenen Steine“ aus dem Totalaufschluss. In Abb. 5.1.1 sind die geogenen Gehalte von Cadmium, Blei, Quecksilber, Zink und Kupfer auf den vier untersuchten BDF für drei Tiefen dargestellt. Darin ist erkennbar, dass auf BDF 11 bei allen fünf Schwermetallen keine größeren Veränderungen mit der Tiefe erkennbar sind. Die Cadmiumkonzentration ist auf BDF 3 mit ca. 0,3 mg/kg in der ersten Tiefe am höchsten. BDF 9 und BDF 10 weisen Werte von ca. 0,2 mg/kg auf. Bei BDF 11 konnten lediglich 0,04 mg/kg gemessen werden, was auch in den Tiefen 2 und 3 der Fall war. Auf BDF 3 und BDF 10 sinken die Konzentrationen in Tiefe 2 auf 0,17 mg/kg. Dagegen ist bei BDF 9 ein Anstieg auf 0,3 mg/kg zu verzeichnen. Bei Blei konnten auf BDF 3 in Tiefe 2 und bei BDF 9 in den Tiefen 1 und 2 Gehalte von ca. 50 mg/kg gemessen werden. Auf allen anderen Flächen und in allen anderen Tiefen waren die Konzentrationen bei geringer Schwankungsbreite mit 20 mg/kg bis 30 mg/kg deutlich geringer. Die Messung von Quecksilber ergab auf BDF 3 für alle Tiefen und bei BDF 9 für Tiefe 1 eine Konzentration von 0,06 mg/kg. Die verbleibenden Gehalte waren mit 0,02 mg/kg bis 0,03 mg/kg nur halb so hoch.

Bei den Nährelementen konnten für Zink Gehalte von ca. 60 bis 80 mg/kg ermittelt werden. Besonders hohe Gehalte wurden auf BDF 9 in Tiefe 2 mit über 120 mg/kg bzw. relativ geringe Gehalte auf BDF 3 mit ca. 20 mg/kg in Tiefe 3 gemessen. Die Gehalte an Kupfer sind jeweils auf BDF 10 mit 30 mg/kg und BDF 11 mit 5 mg/kg für alle drei Tiefen identisch. Auf BDF 3 ist zunächst ein Anstieg von 23 mg/kg in Tiefe 1 auf 35 mg/kg in Tiefe 2 und anschließendem Abfall auf 15 mg/kg erkennbar. BDF 9 weist in den Tiefen 1 und 2 Konzentrationen von 25 bis 30 mg/kg bzw. 40 mg/kg in Tiefenstufe 3 auf.

In Tab. 5.1.1 sind die Hintergrundgehalte für ausgewählte Thüringer Bodenlandschaften dargestellt.

*Tab. 5.1.1: Median der Hintergrundgehalte für die Oberböden ausgewählter Thüringer
Bodenlandschaften (verändert nach POHL et al. 1996:104)*

	Cd [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Cu [mg/kg]
Löß	0,20	25	0,075	60	15
Thüringer Wald	0,25	50	0,15	95	15
Thüringer Schiefergebirge	0,20	40	0,15	110	20

Zum Vergleich sind in Tab. 5.1.1 die Hintergrundgehalte für die den untersuchten BDF entsprechenden Thüringer Bodenlandschaften dargestellt. Danach sind die Schwermetallgehalte auf Lößstandorten (BDF 3) am geringsten. Höhere Gehalte sind in den Bodenlandschaften Thüringer Wald (BDF 11) und Thüringer Schiefergebirge (BDF 9, BDF 10) zu erwarten.

Im Hinblick auf die geogenen Gehalte sind diese Unterschiede zwischen den Bodenlandschaften nicht erkennbar. Diese gemessenen Gehalte für Cadmium, Blei, Zink und Kupfer sind für BDF 3, BDF 8 und BDF 10 in etwa identisch mit den Hintergrundgehalten für die entsprechenden Thüringer Bodenlandschaften. Größerer Unterschiede sind jedoch bei Quecksilber erkennbar, wo die Spannweite der geogenen Gehalte von 0,02 bis 0,06 mg/kg reicht, obwohl der zu erwartende Gehalt zwischen 0,075 und 0,15 mg/kg liegen sollte. Auch auf BDF 11 sind die gemessenen geogenen Gehalte wesentlich geringer als die Hintergrundwerte.

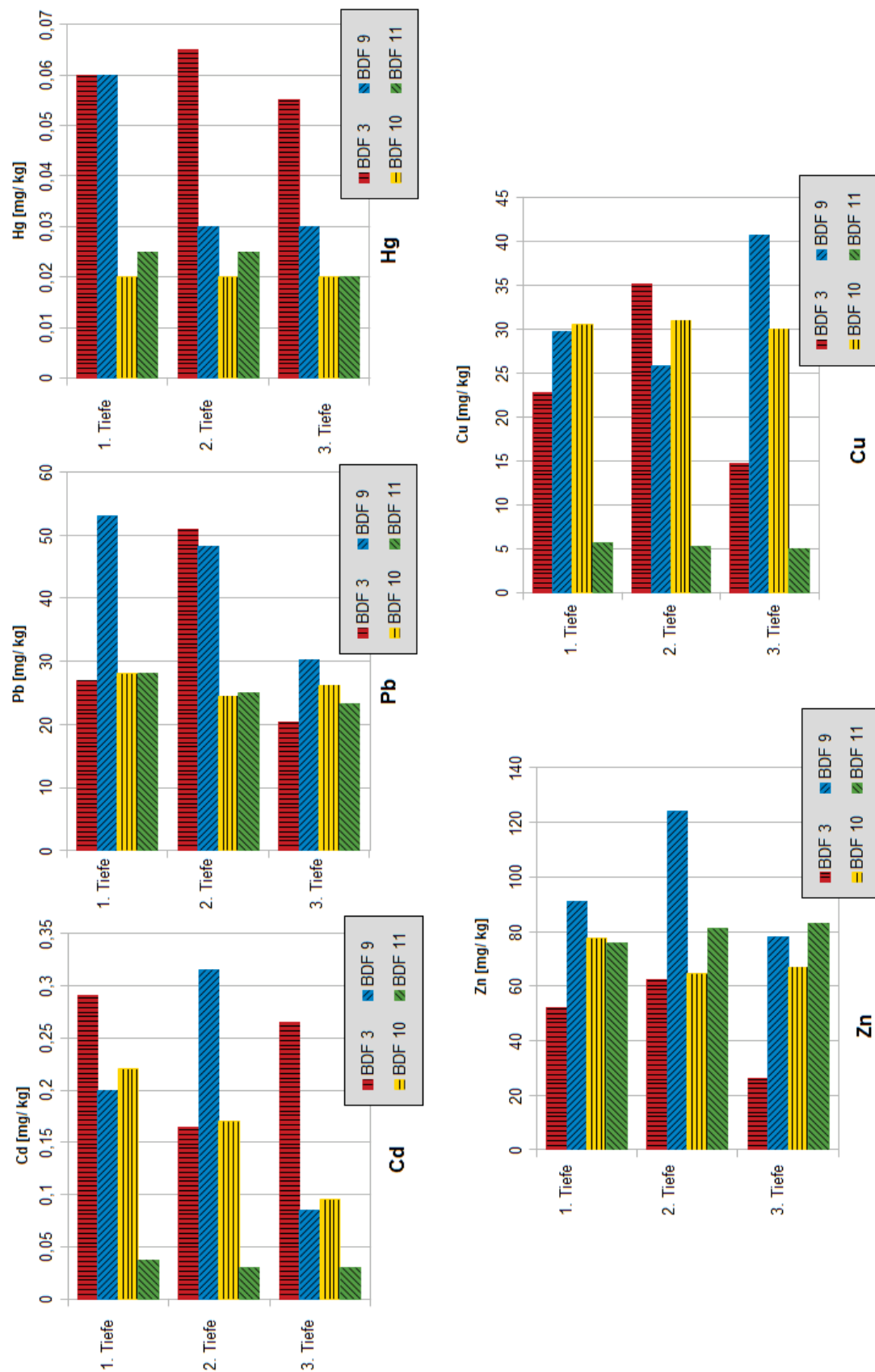


Abb. 5.1.1: Geogene Schwermetallkonzentrationen von Cd, Pb, Hg, Cu, Zn aus dem Totalaufschluss auf ausgewählten landwirtschaftlich genutzten BDF in Thüringen

5.2 Entwicklung der Schwermetallgehalte aus dem Königswasseraufschluss

In den Abbildungen 5.2.1 bis 5.2.5 ist die Entwicklung der Gehalte von Cadmium, Blei, Quecksilber, Zink und Kupfer in drei Tiefen für den Zeitraum von 1993 bis 2012 dargestellt. Die Auswertung der Cadmiumgehalte (Abb. 5.2.2) ergab in Tiefe 1 zwischen 0,05 mg/kg und 0,3 mg/kg. Es ist deutlich zu erkennen, dass auf BDF 3 im Zeitraum von 1993 bis 1997 ein Anstieg der Gehalte von ca. 0,05 mg/kg auf 0,20 mg/kg erfolgte. Ein solcher Anstieg ist auch in den Tiefen 2 und 3 zu verzeichnen. In den folgenden Jahren stagniert der Gehalt auf diesem höheren Niveau. In den Tiefen 2 und 3 fallen die Gehalte aller BDF auf ein konstantes Niveau von ca. 0,1 mg/kg ab. Der Vorsorgewert von 1 mg/kg wird immer unterschritten.

In Abb. 5.2.2 ist die Veränderung der Bleigehalte dargestellt. Im Jahr 1993 wird auf BDF 11 in Tiefe 1 der Vorsorgewert von 70 mg/kg überschritten. In den folgenden Jahren ist jedoch ein Abfall der Konzentration auf ca. 50 mg/kg feststellbar. Für BDF 11 wurde in dieser ersten Tiefe eine sehr große Standardabweichung von ± 10 mg/kg berechnet. Die Werte der drei Acker-BDF liegen im Bereich von 20 bis 30 mg/kg. In den Tiefen 2 und 3 findet ein Rückgang der Gehalte aller BDF auf ca. 10 bis 20 mg/kg statt.

Die Quecksilbergehalte (Abb. 5.2.3) sind auf BDF 11 mit ca. 0,15 mg/kg in der ersten Tiefe und 0,10 mg/kg in den weiteren Tiefenstufen am höchsten. Der Vorsorgewert von 0,5 mg/kg wird jedoch ebenso wie auf BDF 3, 9 und 10 mit ca. 0,10 mg/kg in Tiefe 1 und 0,05 mg/kg in Tiefe 2, in keinem Fall überschritten. Als Trend ist auf allen BDF und in allen Tiefen ein leichter Rückgang der Gehalte erkennbar.

Die Auswertung der Mikronährstoffe ergab für Zink auf BDF 11 durchschnittlich 90 mg/kg in allen drei Tiefen. Die Gehalte auf BDF 9 und 10 mit 50 bis 70 mg/kg und auf BDF 3 mit 40 bis 50 mg/kg sind hingegen deutlich geringer. Im Jahr 1997 ist auf BDF 11 ein Peak mit ca. 110 mg/kg zu erkennen, welcher sich in allen drei Tiefen nachvollziehen lässt. Weitere Tendenzen im Zeitraum von 1992 bis 2012 sind nicht nachweisbar. Kleinere Anstiege und Rückgänge der Gehalte liegen im Bereich der Standardabweichung. In größerer Tiefe ist, mit Ausnahme von BDF 11, eine Abnahme der Gehalte um ca. 10 mg/kg erkennbar. Auf keiner der betrachteten BDF wird der Vorsorgewert von 150 mg/kg überschritten.

Königswasseraufschluss Cadmium

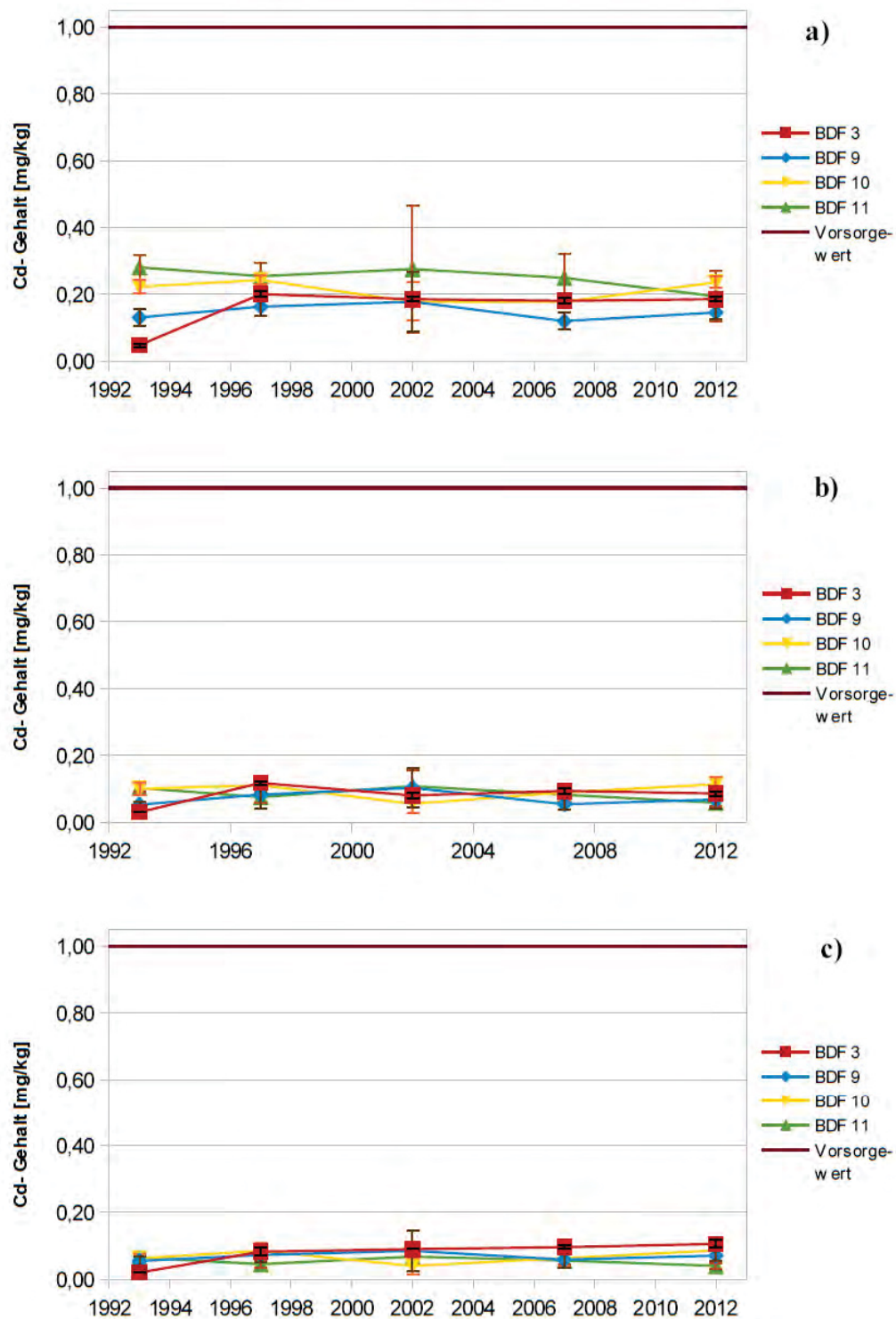


Abb. 5.2.1: Mittelwerte der Schwermetallgehalte und deren Standardabweichung für Cadmium auf ausgewählten BDF in: a) Tiefe 1; b) Tiefe 2 und c) Tiefe 3

Königswasseraufschluss Blei

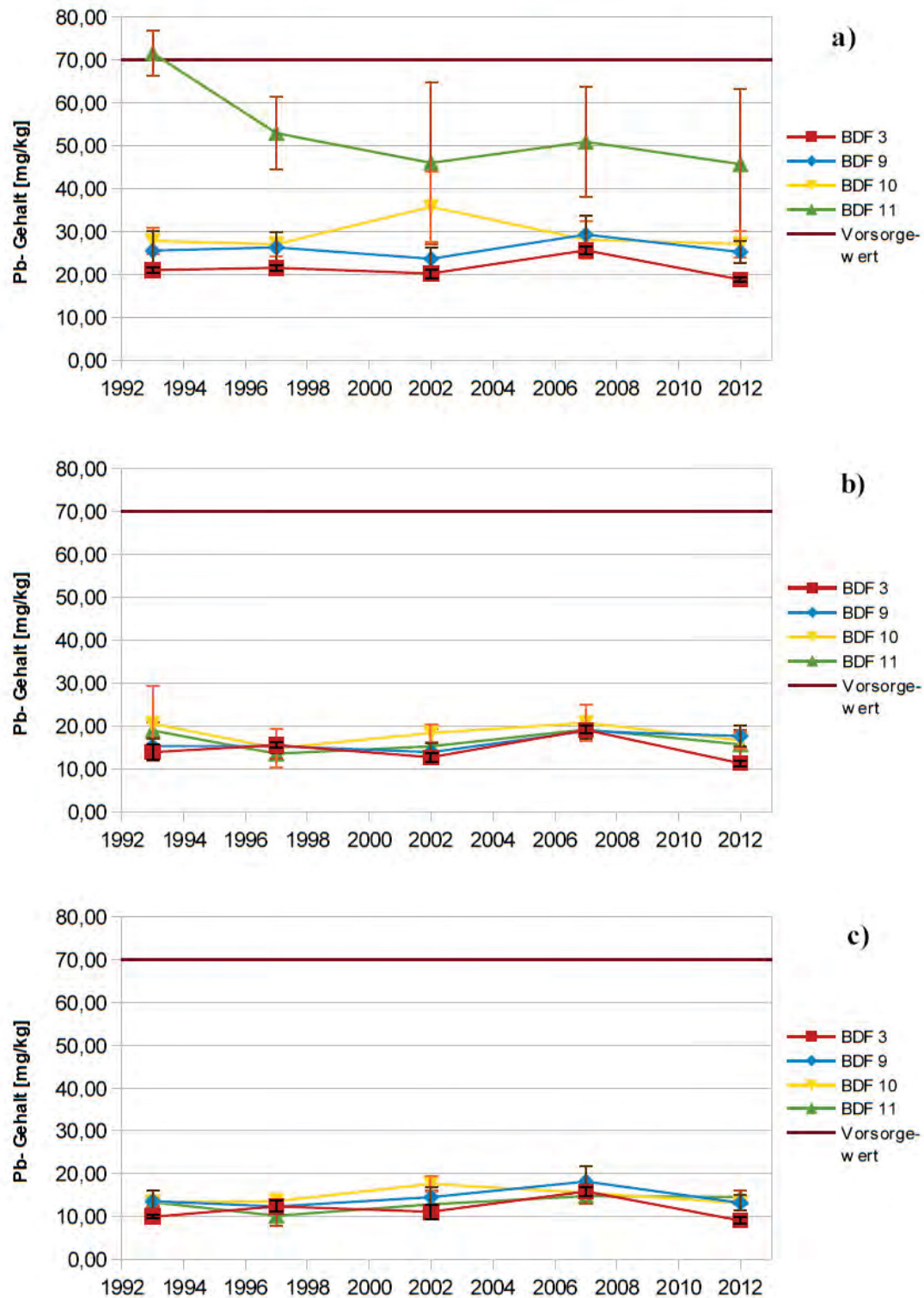


Abb. 5.2.2: Mittelwerte der Schwermetallgehalte und deren Standardabweichung für Blei auf ausgewählten BDF in: a) Tiefe 1; b) Tiefe 2 und c) Tiefe 3

Königswasseraufschluss Quecksilber

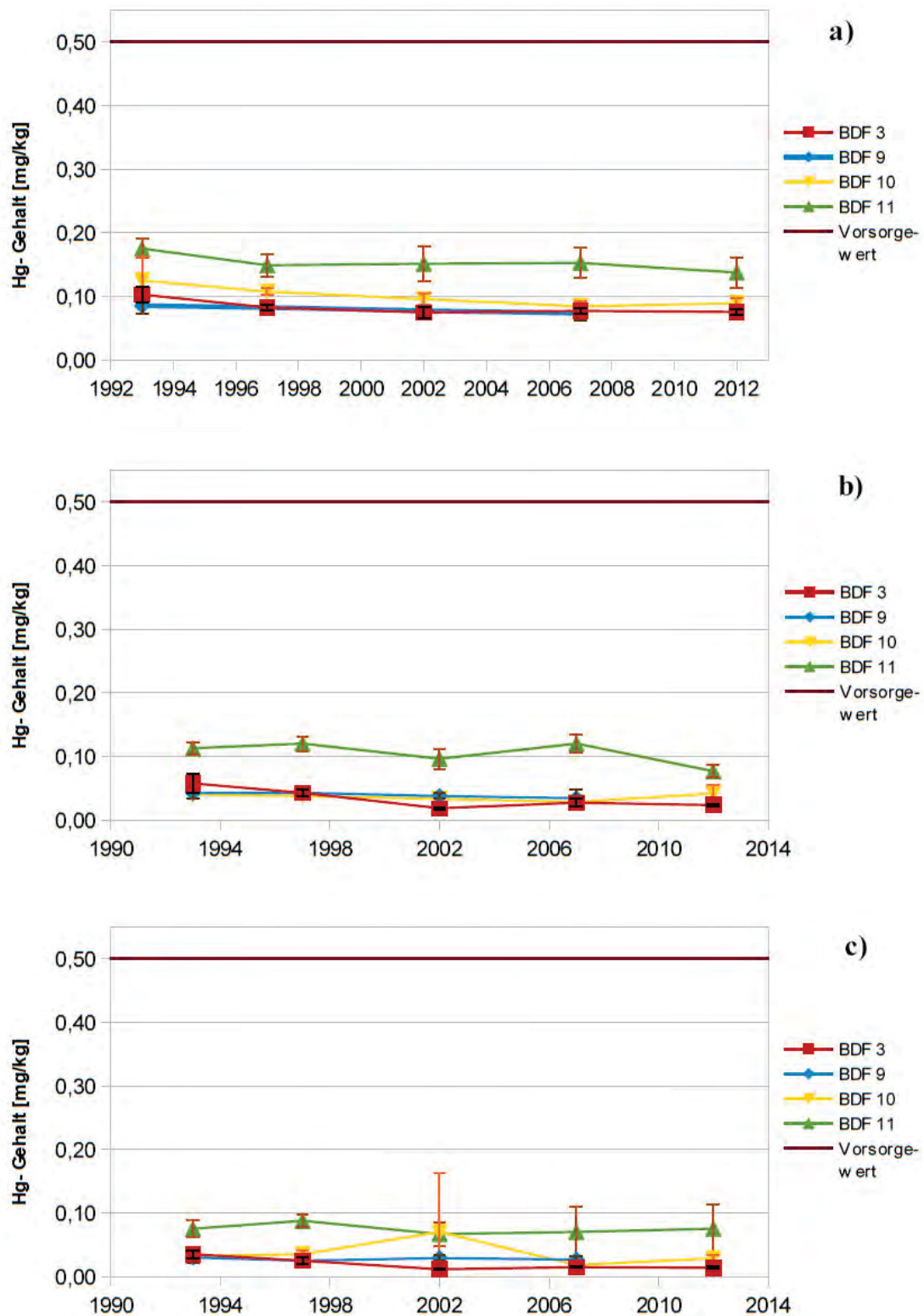


Abb. 5.2.3: Mittelwerte der Schwermetallgehalte und deren Standardabweichung für Quecksilber auf ausgewählten BDF in: a) Tiefe 1; b) Tiefe 2 und c) Tiefe 3

Königswasseraufschluss Zink

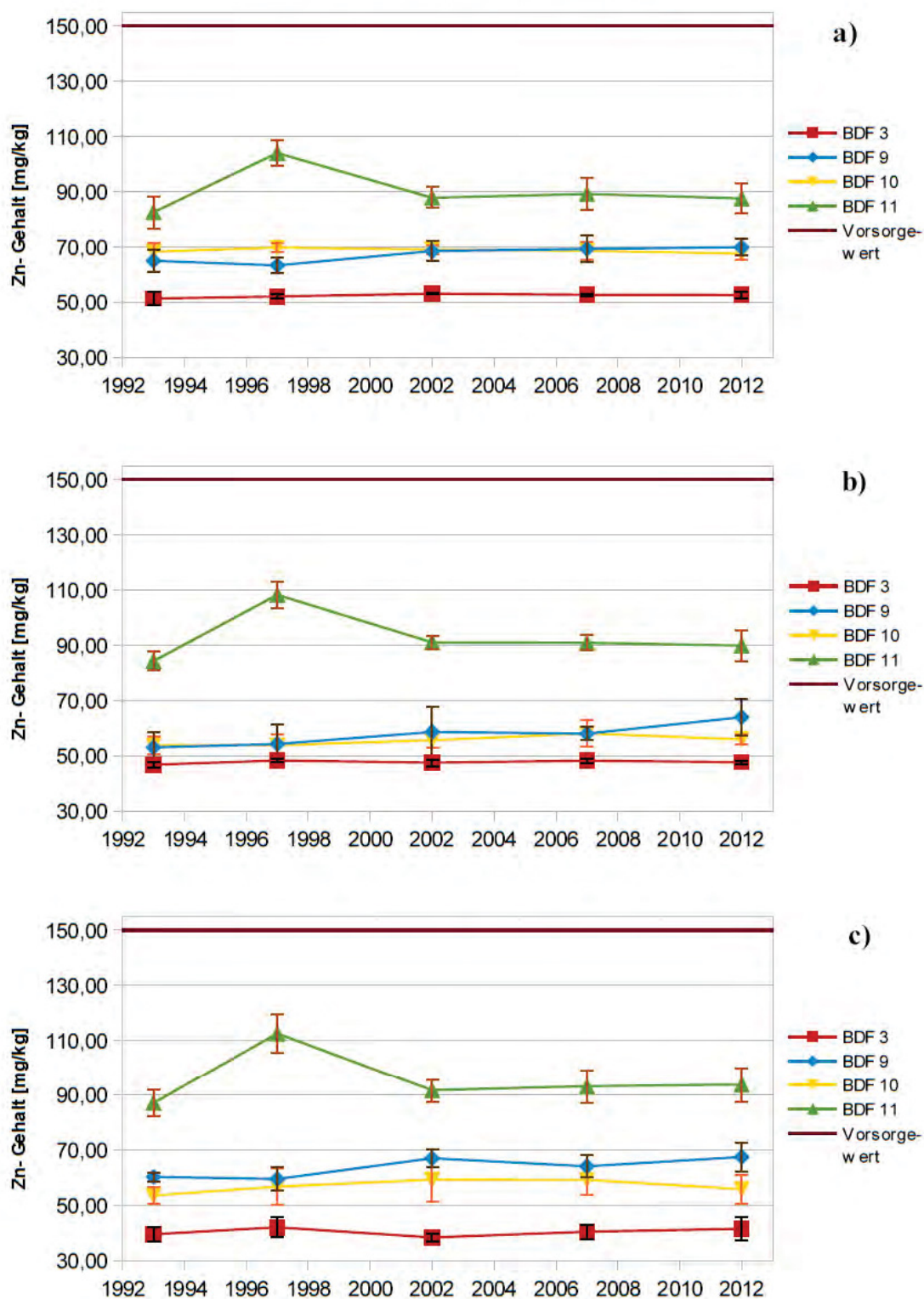


Abb. 5.2.4: Mittelwerte der Schwermetallgehalte und deren Standardabweichung für Zink auf ausgewählten BDF in: a) Tiefe 1; b) Tiefe 2 und c) Tiefe 3

Königswasseraufschluss Kupfer

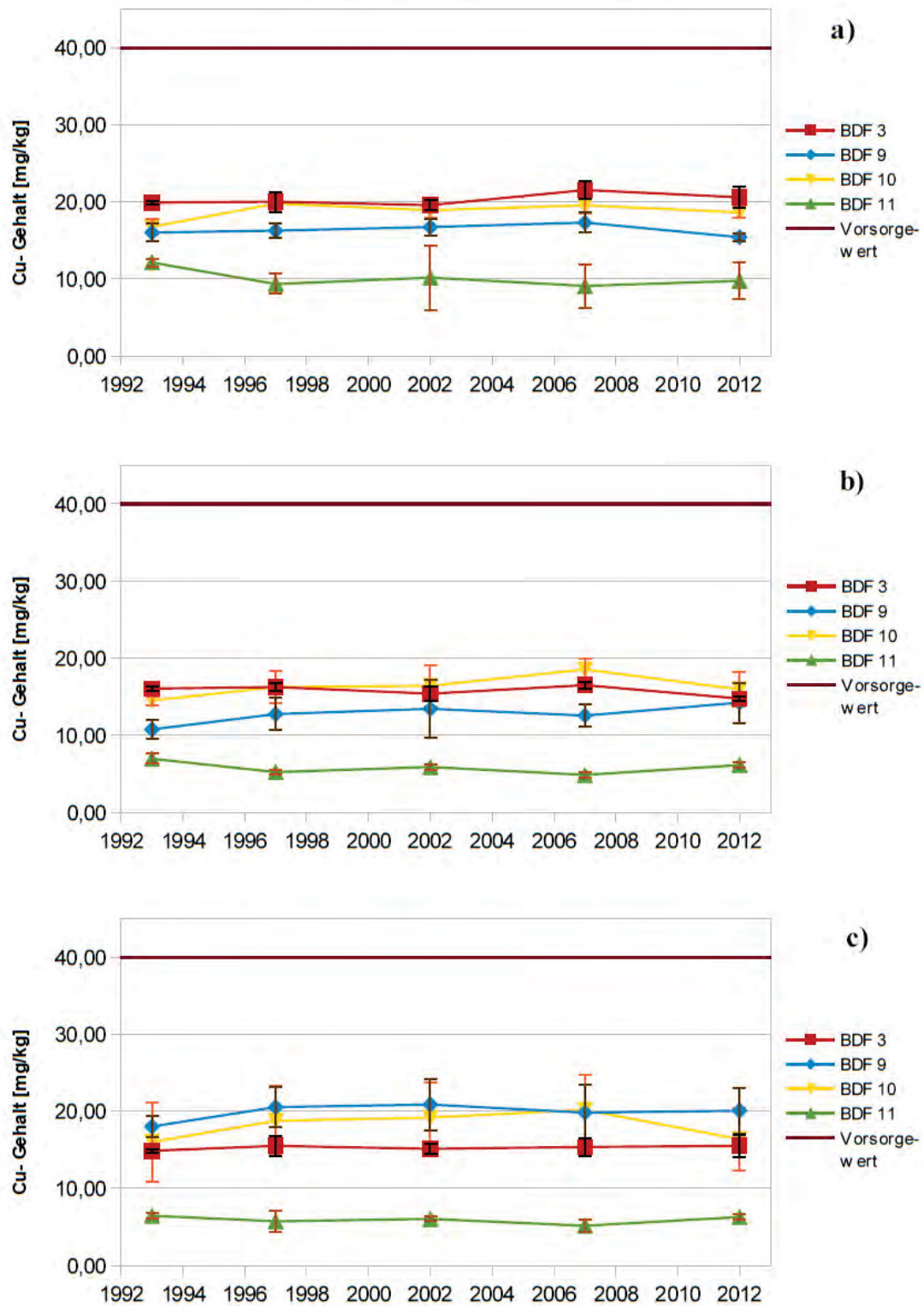


Abb. 5.2.5: Mittelwerte der Schwermetallgehalte und deren Standardabweichung für Kupfer auf ausgewählten BDF in: a) Tiefe 1; b) Tiefe 2 und c) Tiefe 3

Bei den Kupfergehalten (Abb. 5.2.5) ist im Gegensatz zu den übrigen betrachteten Schwermetallen der Gehalt auf BDF 11 in allen drei Tiefen mit ca. 10 mg/kg in Tiefe 1 und 5 mg/kg in den Tiefen 2 und 3 am geringsten. BDF 9, 10 und 11 weisen Gehalte zwischen 10 und 20 mg/kg auf, wobei mit der Tiefe ein leichter Rückgang zu verzeichnen ist. Die Verteilung der Messwerte (Minimal-, Maximalwert, Quartile) sind im Anhang für alle BDF und alle Schwermetalle als Boxplots dargestellt.

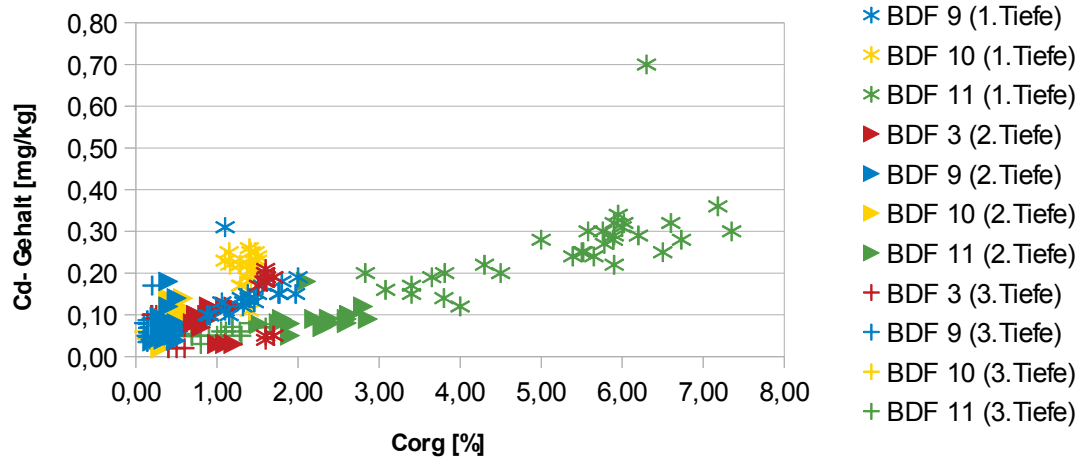
5.3 Korrelationsverhältnisse zwischen Bodenparametern und dem Schwermetallgehalt

Weiterhin wurde die Abhängigkeit der Schwermetallgehalte von den Bodenparametern untersucht. Augenmerk galt dabei dem Corg-Gehalt, dem pH-Wert und dem Tonanteil. In Abb. 5.2.6 (graphische Darstellung der Regression) bzw. in Tab. 5.2.1 (Bestimmtheitsmaß) wurde die Abhängigkeit von Schwermetallgehalt und dem Corg-Gehalt dargestellt. Dabei ergab sich auf BDF 3 für Quecksilber, Blei, Kupfer und Zink ein starker, sowie für Cadmium ein mittlerer Zusammenhang. Auf BDF 9 konnten für die nicht essentiellen Elemente starke bis mittel starke bzw. für die Mikronährstoffe keine Abhängigkeiten festgestellt werden. Auch auf BDF 10 ist mit Ausnahme von Kupfer ein starker positiver Einfluss des Corg-Gehaltes auf die jeweiligen Schwermetallgehalte erkennbar. Auf BDF 11 ist mit Ausnahme von Zink die wohl stärkste Abhängigkeit gegeben.

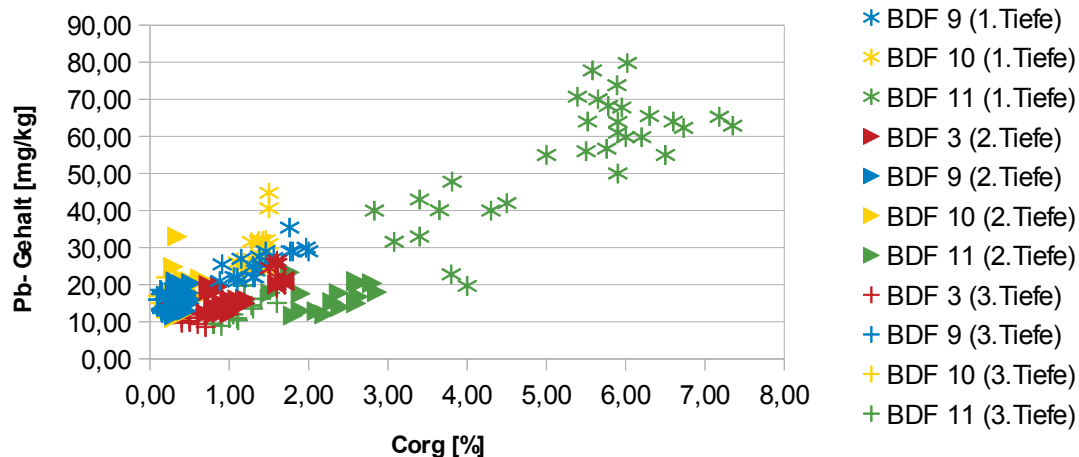
Tab. 5.3.1: r^2 für den Zusammenhang von Schwermetallgehalt und Corg-Gehalt

	Cd	Pb	Hg	Zn	Cu
BDF 3	0,29	0,60	0,81	0,74	0,70
BDF 9	0,50	0,83	0,92	0,17	0,02
BDF 10	0,81	0,68	0,52	0,61	0,01
BDF 11	0,76	0,87	0,80	0,03	0,75

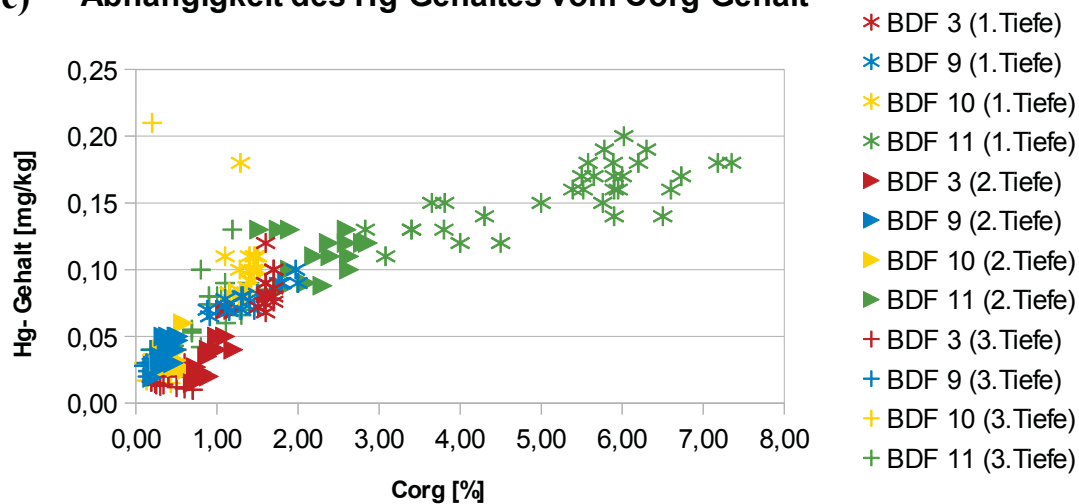
a) Abhängigkeit des Cd-Gehaltes vom Corg-Gehalt



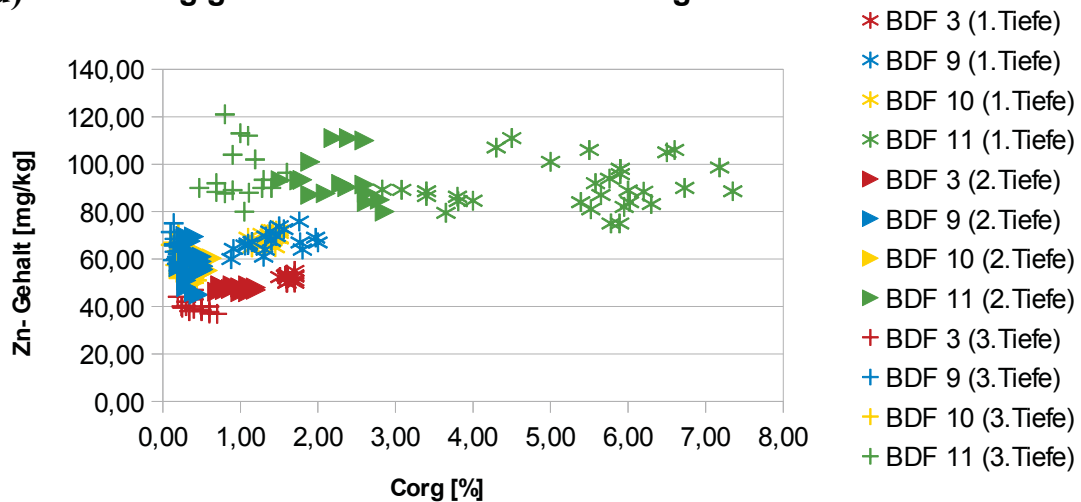
b) Abhängigkeit des Pb-Gehaltes vom Corg-Gehalt



c) Abhängigkeit des Hg-Gehaltes vom Corg-Gehalt



d) **Abhängigkeit des Zn-Gehaltes vom Corg-Gehalt**



e) **Abhängigkeit des Cu-Gehaltes vom Corg-Gehalt**

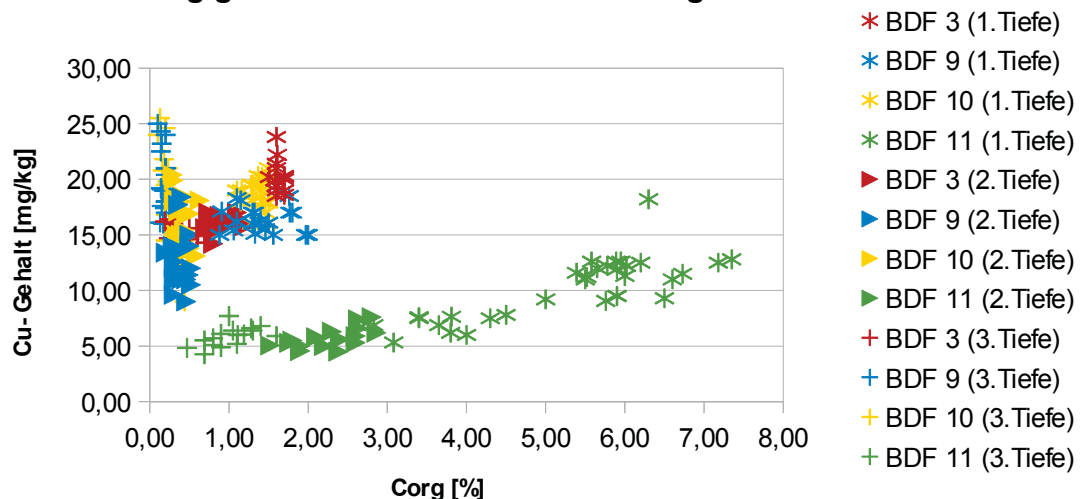


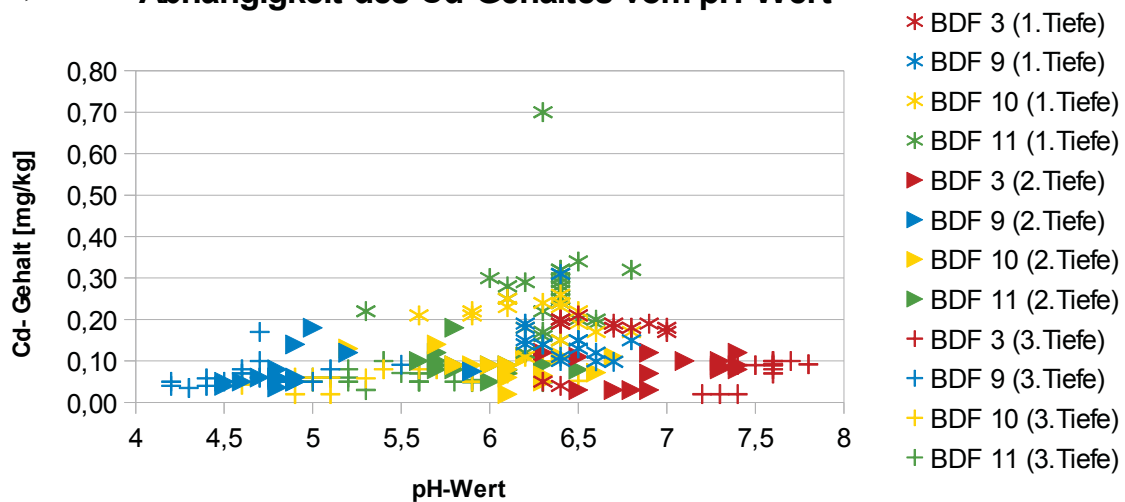
Abb. 5.3.1: Zusammenhang von Schwermetallgehalt: a) Cadmium, b) Blei, c) Quecksilber, d) Zink, e) Kupfer aus dem Königwasseraufschluss und dem Gehalt an organischem Material

Unter Berücksichtigung des pH-Wertes (Abb. 5.3.2 sowie Tab. 5.2.2) ergeben sich für Quecksilber auf BDF 3 und BDF 9 sowie für Blei auf BDF 9 starke Abhängigkeiten. Kein Zusammenhang ist auf BDF 3 für Cadmium, auf BDF 9 für Kupfer, auf BDF 10 für Quecksilber, Kupfer und Zink sowie auf BDF 11 für Zink erkennbar. Für alle anderen Verhältnisse konnte ein schwacher bis mittlerer Zusammenhang in Verbindung von pH-Wert und Schwermetallgehalten festgestellt werden.

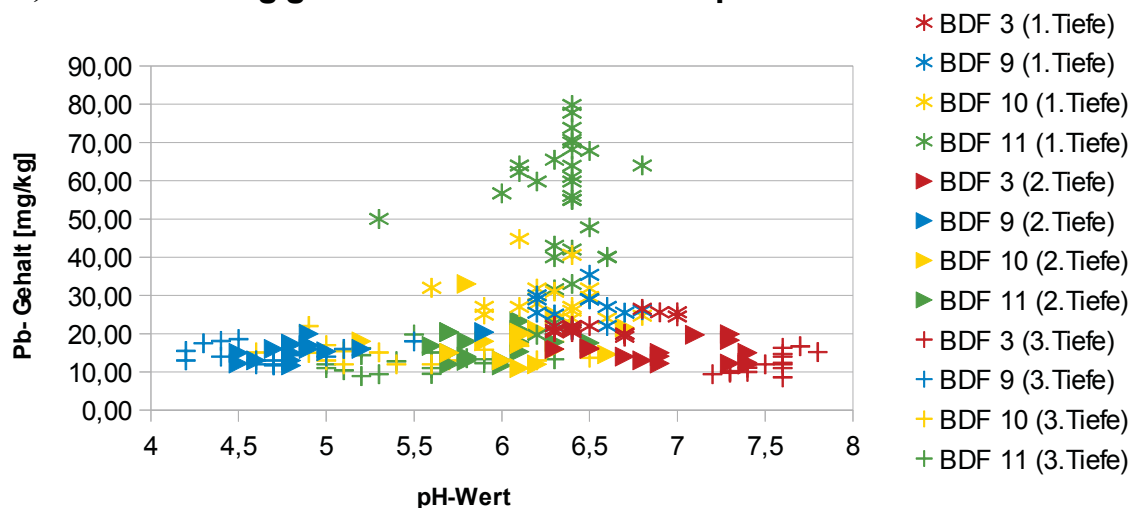
Tab. 5.3.2: r^2 für den Zusammenhang von pH-Wert und Schwermetallgehalt

	Cd	Pb	Hg	Zn	Cu
BDF 3	0,08	0,36	0,75	0,56	0,43
BDF 9	0,44	0,67	0,76	0,19	0,00
BDF 10	0,21	0,14	0,01	0,02	0,07
BDF 11	0,34	0,43	0,40	0,06	0,21

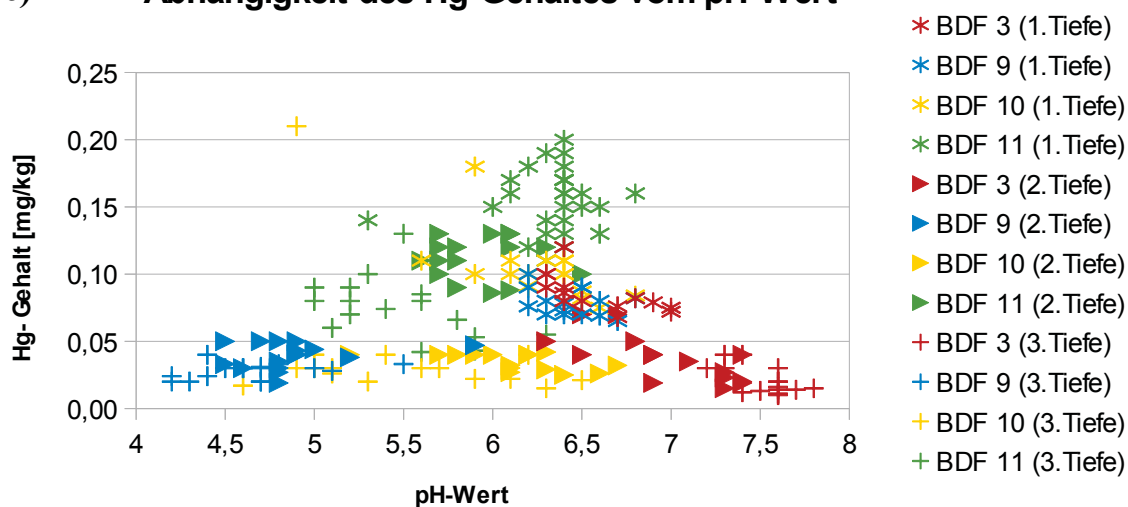
a) **Abhängigkeit des Cd-Gehaltes vom pH-Wert**



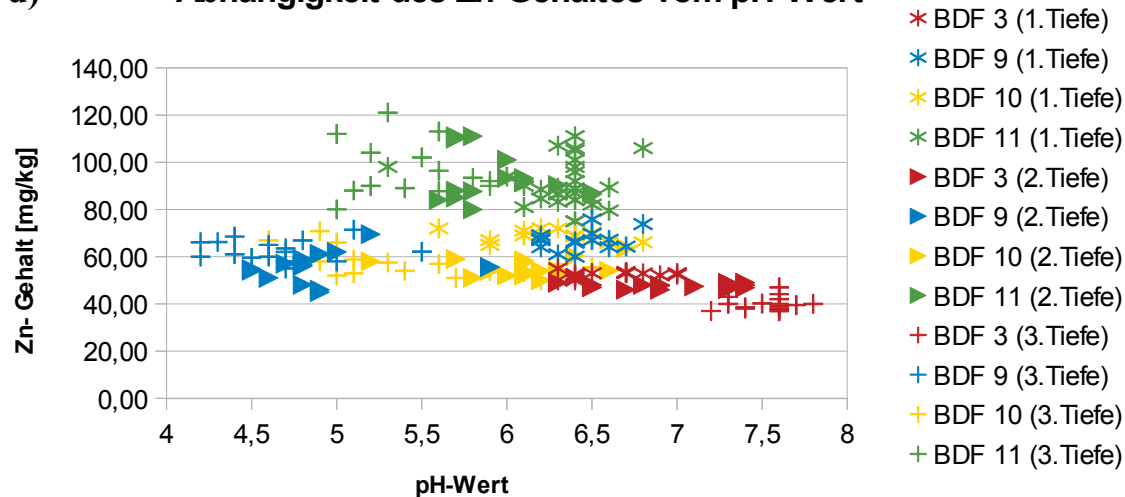
b) **Abhängigkeit des Pb-Gehaltes vom pH-Wert**



c) **Abhängigkeit des Hg-Gehaltes vom pH-Wert**



d) **Abhängigkeit des Zn-Gehaltes vom pH-Wert**



e) **Abhängigkeit des Cu-Gehaltes vom pH-Wert**

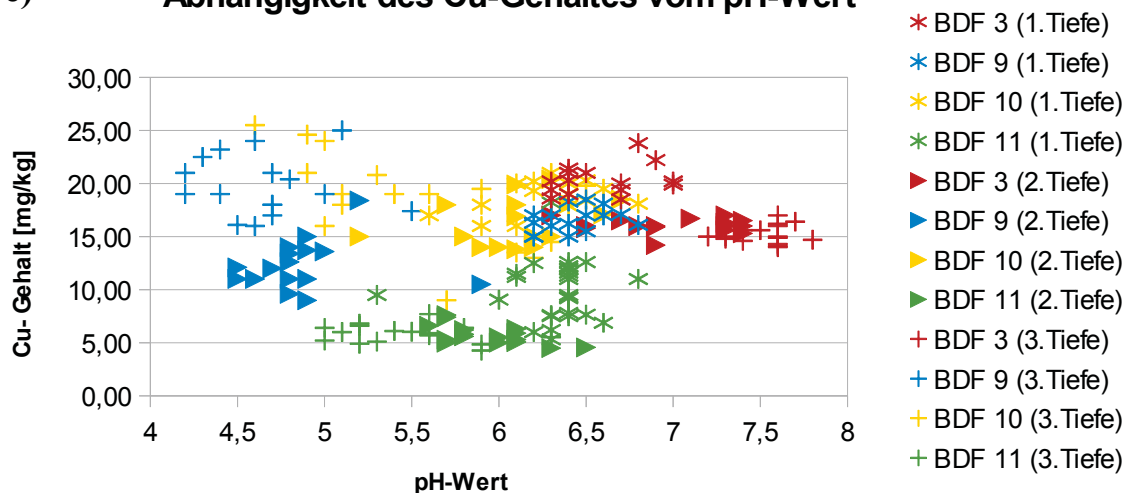


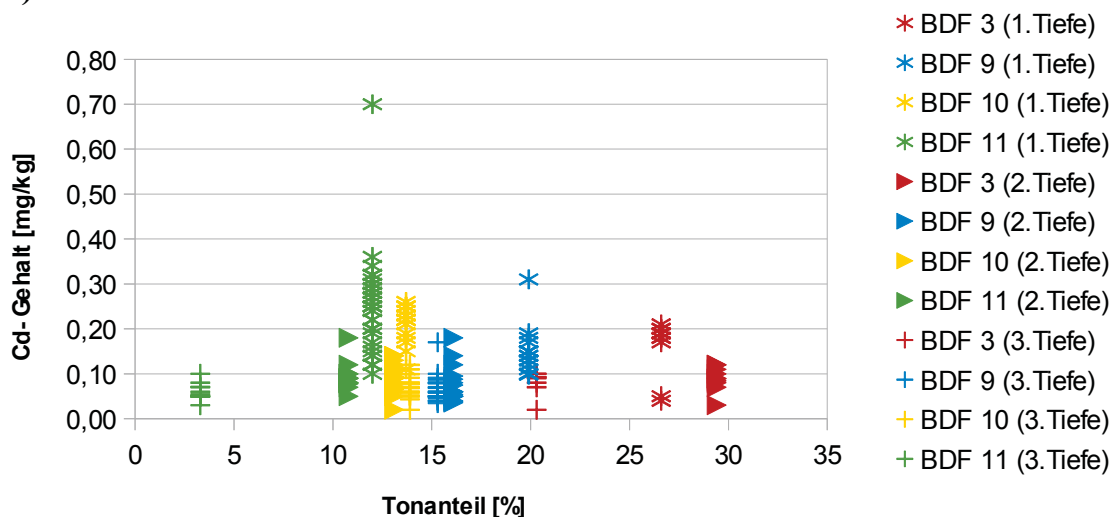
Abb. 5.3.2: Zusammenhang von Schwermetallgehalt: a) Cadmium, b) Blei, c) Quecksilber, d) Zink, e) Kupfer aus dem Königwasserauflösung und dem pH-Wert

Tab. 5.3.3 bzw. Abb. 5.3.3 stellen die Ergebnisse der Regression von Schwermetallgehalt und Tongehalt dar. Ein deutlicher Zusammenhang konnte auf BDF 9 mit Ausnahme von Kupfer und auf BDF 11 mit Ausnahme von Zink berechnet werden. BDF 3 weist einen mittleren Zusammenhang für Zink, bzw. schwache Zusammenhänge für Quecksilber und Kupfer auf. Auf BDF 10 ist hingegen keinerlei Korrelation erkennbar.

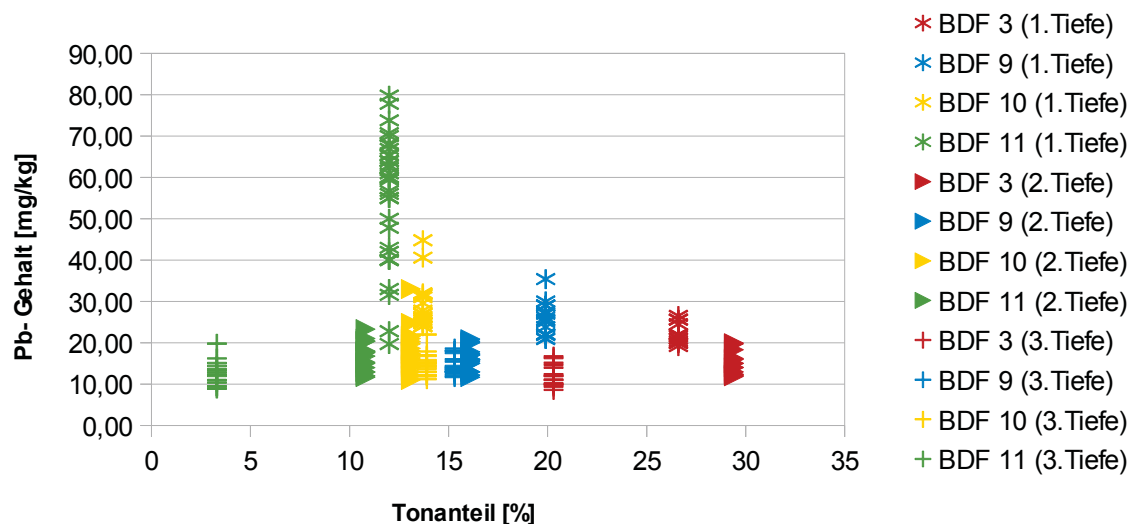
Tab. 5.3.3: r^2 für den Zusammenhang von Tongehalt und Schwermetallgehalt

	Cd	Pb	Hg	Zn	Cu
BDF 3	0,03	0,17	0,14	0,51	0,08
BDF 9	0,48	0,76	0,87	0,16	0,01
BDF 10	0,01	0,00	0,04	0,08	0,07
BDF 11	0,36	0,39	0,52	0,05	0,24

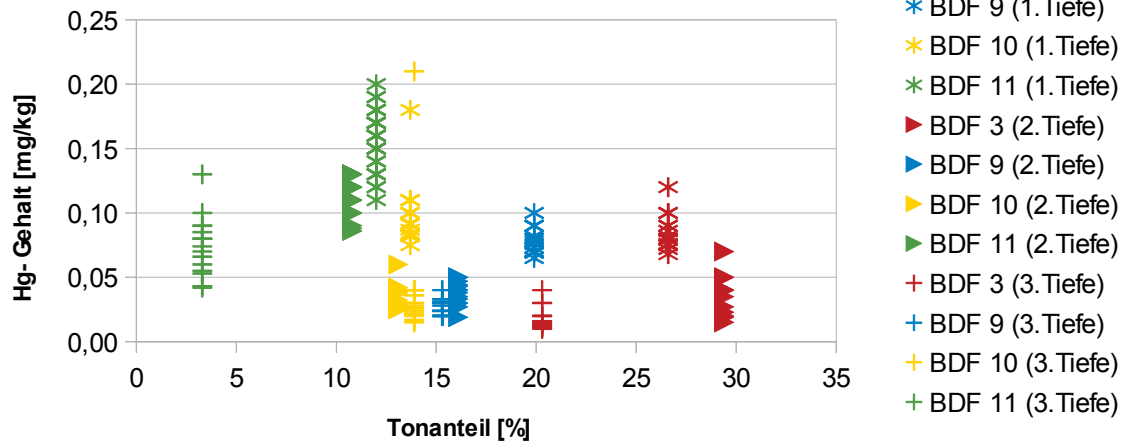
a) **Abhängigkeit des Cd-Gehaltes vom Tongehalt**



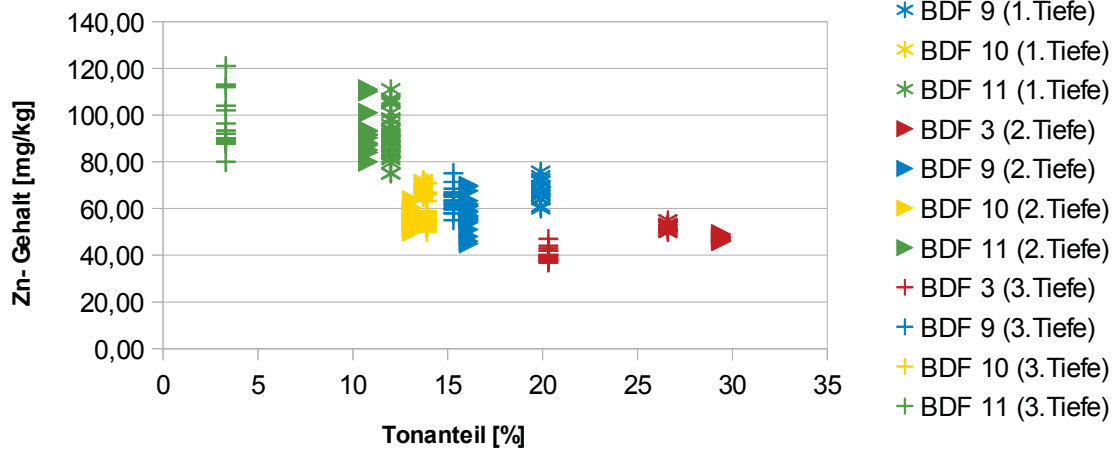
b) **Abhängigkeit des Pb-Gehaltes vom Tongehalt**



c) **Abhängigkeit des Hg-Gehaltes vom Tongehalt**



d) **Abhängigkeit des Zn-Gehaltes vom Tongehalt**



e) **Abhängigkeit des Cu-Gehaltes vom Tongehalt**

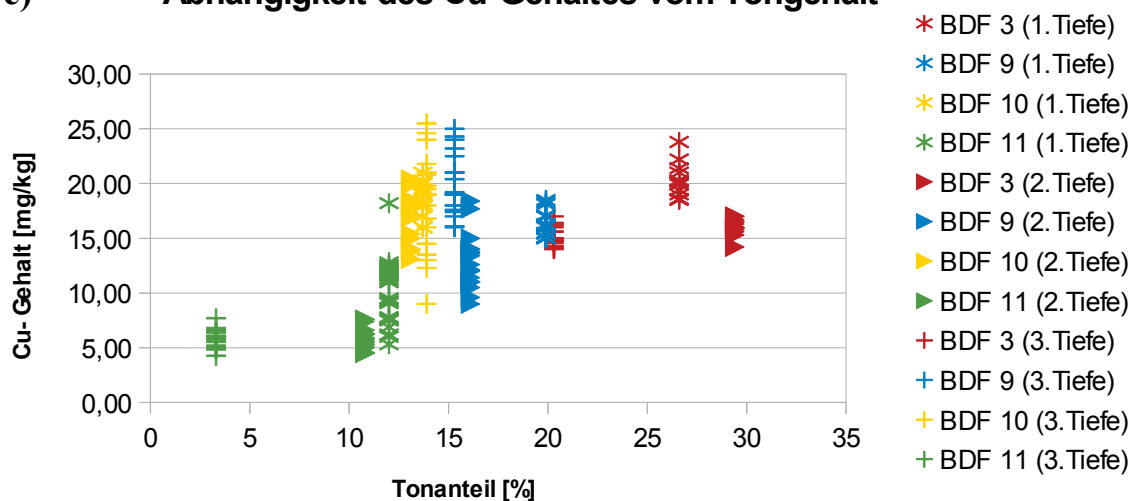


Abb. 5.3.3: Zusammenhang von Schwermetallgehalt: a) Cadmium, b) Blei, c) Quecksilber, d) Zink, e) Kupfer aus dem Königwasseraufschluss und dem Tongehalt

5.4 Pflanzenverfügbarkeit und Nährstoffversorgung

Ammoniumnitrat und klassische Methode (Tab. 5.4.1) zeigen, dass nur ein sehr geringer Anteil der im Boden vorhandenen Schwermetalle auch pflanzenverfügbar ist. So liegen die Gehalte von Königswasser und Totalaufschluss im Bereich [mg/kg] wohingegen jene aus dem Ammoniumnitrataufschluss im Bereich [$\mu\text{g/kg}$] liegen. Die Bewertung der pflanzenverfügbaren Nährstoffe (Tab. 5.4.1; Spalte pflanzenverfügbar nach klassischer Methode) erfolgte auf Grundlage der Richtwerte für Mikronährstoffgehalte von Acker- und Grünlandböden (ZORN et al. 2007:132 f.). Daraus ergab sich eine Überversorgung (lila) mit Zink und Kupfer für BDF 3 im Jahr 1997 sowie eine Unterversorgung (gelb) mit Zink in den Jahren 1997 und 2002 auf BDF 9. Eine weitere Unterversorgung mit Kupfer war auf BDF 9 (2002) sowie auf BDF 11 (1997, 2002) gegeben. Bei allen anderen BDF war in den dargestellten Jahren eine optimale Versorgung (grün) mit Kupfer und Zink gewährleistet.

Der Ammoniumnitrataufschluss ergab auf BDF 9 für alle betrachteten Schwermetalle in den Jahren 1997, 2002 und 2012 die höchsten pflanzenverfügbaren Gehalte. Nach dieser Methode wurden Prüfwerte für Ackerflächen, bei deren Überschreitung es zu Wachstumsbeeinträchtigungen bei Kulturpflanzen kommen kann (Tab. 5.4.1), festgelegt. Dieser wird nach Anhang 2 BBodSchV für Zink mit 2 mg/kg und Kupfer 1 mg/kg angegeben. Wie in Tab. 5.4.2 erkennbar ist, werden diese kritischen Gehalte für Zink, mit einem Maximum von 840 $\mu\text{g/kg}$ auf BDF 9 im Jahr 2002 und Kupfer, mit einem Maximum von 280 $\mu\text{g/kg}$ auf BDF 9 im Jahr 2002 deutlich unterschritten.

Tab. 5.4.1: Prüfwerte aus dem Ammoniumnitrataufschluss (Acker) und Maßnahmenwerte aus dem Königswasseraufschluss (Grünland) (nach BBodSchV Anhang 2)

	Cd [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Cu [mg/kg]
Prüfwert (Acker)	0,04/0,01 ²⁾	0,1	5 ¹⁾	2	1
Maßnahmenwert (Grünland)	20	1200	2	-	1300

1) Hg aus dem Königswasseraufschluss

2) für Cadmium Maßnahmenwert (Acker): 0,04 [mg/kg] für Brotweizenanbau und stark Cd anreichernde Gemüsearten, sonst 0,01 [mg/kg]

Tab. 5.4.2: Methodenvergleich und Analyse der Pflanzenversorgung mit Mikronährstoffen
(lila: überversorgt, grün optimale Versorgung, gelb: unterversorgt)

			1997			2002			2012		
			KW [mg/kg]	AN [µg/kg]	P [mg/kg]	HF [mg/kg]	KW [mg/kg]	AN [µg/kg]	P [mg/kg]	KW [mg/kg]	AN [µg/kg]
Cd	BDF 3	1. Tiefe	0,20	2,85	n.b.	0,49	0,19	1,25	n.b.	0,19	2,47
		2. Tiefe	0,12	1,55	n.b.	0,34	0,08	1,00	n.b.	0,09	0,72
		3. Tiefe	0,08	1,00	n.b.	0,31	0,09	1,00	n.b.	0,11	0,47
	BDF 9	1. Tiefe	0,16	3,15	n.b.	0,38	0,18	4,00	n.b.	0,15	2,28
		2. Tiefe	0,08	17,18	n.b.	0,33	0,10	13,75	n.b.	0,07	9,10
		3. Tiefe	0,07	17,08	n.b.	0,29	0,09	11,00	n.b.	0,07	10,68
	BDF 10	1. Tiefe	0,24	2,53	n.b.	0,53	0,18	2,00	n.b.	0,24	5,53
		2. Tiefe	0,11	3,30	n.b.	0,37	0,06	3,00	n.b.	0,11	3,60
		3. Tiefe	0,09	4,20	n.b.	0,31	0,04	5,50	n.b.	0,09	4,40
	BDF 11	1. Tiefe	0,25	1,08	n.b.	0,44	0,28	1,00	n.b.	0,19	n.b.
		2. Tiefe	0,08	2,33	n.b.	0,29	0,11	1,00	n.b.	0,06	n.b.
		3. Tiefe	0,05	1,00	n.b.	0,27	0,07	1,00	n.b.	0,04	n.b.
Pb	BDF 3	1. Tiefe	21,50	38,75	n.b.	29,58	20,18	5,25	n.b.	18,78	0,50
		2. Tiefe	15,50	39,08	n.b.	21,38	12,65	5,00	n.b.	11,25	0,50
		3. Tiefe	12,25	40,78	n.b.	18,25	11,03	5,00	n.b.	8,98	0,50
	BDF 9	1. Tiefe	26,25	30,00	n.b.	31,20	23,60	10,00	n.b.	25,18	2,10
		2. Tiefe	15,25	69,13	n.b.	21,53	13,83	42,75	n.b.	17,60	24,25
		3. Tiefe	12,25	90,95	n.b.	20,05	14,40	95,00	n.b.	13,10	40,80
	BDF 10	1. Tiefe	27,00	30,00	n.b.	34,73	35,70	5,75	n.b.	27,03	1,04
		2. Tiefe	14,75	30,00	n.b.	24,00	18,30	5,25	n.b.	16,58	1,48
		3. Tiefe	13,50	36,25	n.b.	21,58	17,50	8,75	n.b.	13,03	2,43
	BDF 11	1. Tiefe	52,88	32,68	n.b.	58,45	45,94	5,38	n.b.	45,65	n.b.
		2. Tiefe	13,50	30,00	n.b.	25,65	15,23	5,00	n.b.	15,65	n.b.
		3. Tiefe	10,08	30,00	n.b.	23,03	12,75	6,00	n.b.	14,45	n.b.
Zn	BDF 3	1. Tiefe	52,00	260,00	3,65	68,35	53,05	120,00	3,00	52,58	50,00
		2. Tiefe	48,25	260,00	1,35	64,53	47,45	120,00	0,50	47,65	50,00
		3. Tiefe	42,00	260,00	0,53	56,20	38,33	120,00	0,50	41,50	50,00
	BDF 9	1. Tiefe	63,25	260,00	1,10	84,75	68,48	150,00	0,95	69,85	102,15
		2. Tiefe	54,25	537,50	1,08	74,28	58,60	467,50	1,08	63,95	399,50
		3. Tiefe	59,50	750,00	1,48	81,20	66,98	840,00	1,55	67,45	639,00
	BDF 10	1. Tiefe	69,75	260,00	2,50	88,88	69,03	120,00	2,63	67,55	84,90
		2. Tiefe	53,75	260,00	0,60	72,18	55,63	120,00	0,58	55,95	87,50
		3. Tiefe	56,75	260,00	0,53	77,23	59,25	222,50	0,50	55,83	75,25
	BDF 11	1. Tiefe	104,00	291,25	n.b.	119,75	87,80	120,00	3,54	87,54	n.b.
		2. Tiefe	108,25	260,00	n.b.	128,00	91,05	120,00	1,93	89,88	n.b.
		3. Tiefe	112,50	260,00	n.b.	127,50	91,63	120,00	1,40	93,68	n.b.
Cu	BDF 3	1. Tiefe	20,00	100,00	8,88	23,13	19,55	30,00	7,78	20,58	28,05
		2. Tiefe	16,25	100,00	5,20	19,45	15,40	30,00	3,83	14,75	14,28
		3. Tiefe	15,50	100,00	3,08	19,00	15,10	30,00	2,28	15,50	10,00
	BDF 9	1. Tiefe	16,25	100,00	5,45	20,73	16,73	100,00	3,78	15,40	22,40
		2. Tiefe	12,75	100,00	2,85	17,30	13,43	101,25	3,53	14,23	48,35
		3. Tiefe	20,50	225,00	3,10	24,45	20,85	268,75	2,55	20,05	120,25
	BDF 10	1. Tiefe	19,75	100,00	5,10	22,45	18,90	33,25	4,35	18,63	33,68
		2. Tiefe	16,25	100,00	2,55	19,45	16,40	30,00	1,95	15,95	27,98
		3. Tiefe	18,75	100,00	1,83	22,48	19,15	30,00	1,48	16,35	19,88
	BDF 11	1. Tiefe	9,35	100,00	3,40	14,88	10,15	33,25	2,96	9,75	n.b.
		2. Tiefe	5,23	100,00	1,05	11,93	5,88	30,00	1,23	6,14	n.b.
		3. Tiefe	5,73	100,00	0,85	12,08	6,03	30,00	0,80	6,28	n.b.

KW= Königswasseraufschluss

AN= Amoniumnitratenaufschluss

P= Pflanzenverfügbar nach klassischer Methode

HF= Totalaufschluss mit Flusssäure

n.b.= nicht bestimmt

5.5 Methodenvergleich

In Tab. 5.4.2 sind die Totalgehalte (HF), Königswasser aufgeschlossenen Gehalte (KW) sowie die pflanzenverfügbaren Gehalte nach „klassischer Methode“ (P) und Ammoniumnitratmethode (AN) für die Schwermetalle Cadmium, Blei, Zink und Kupfer dargestellt. Auf Grund von Datenlücken wurden exemplarisch die Jahre 1997, 2002 und 2012 betrachtet. Für das Jahr 2002 war ein nahezu kompletter Datensatz für die Bestimmung der Schwermetallgehalte aus allen vier dargestellten Aufschlüssen vorhanden. Für das Jahr 1997 waren Daten des Gesamtaufschlusses nicht auswertbar und für 2012 lagen bis zum Abschluss dieser Arbeit noch keine Messergebnisse für den Gesamtaufschluss sowie die Bestimmung der pflanzenverfügbaren Nährstoffe nach klassischer Methode vor. Bei Quecksilber waren ungenügend Daten vorhanden, sodass in dieser Darstellung auf jenes Element verzichtet wurde.

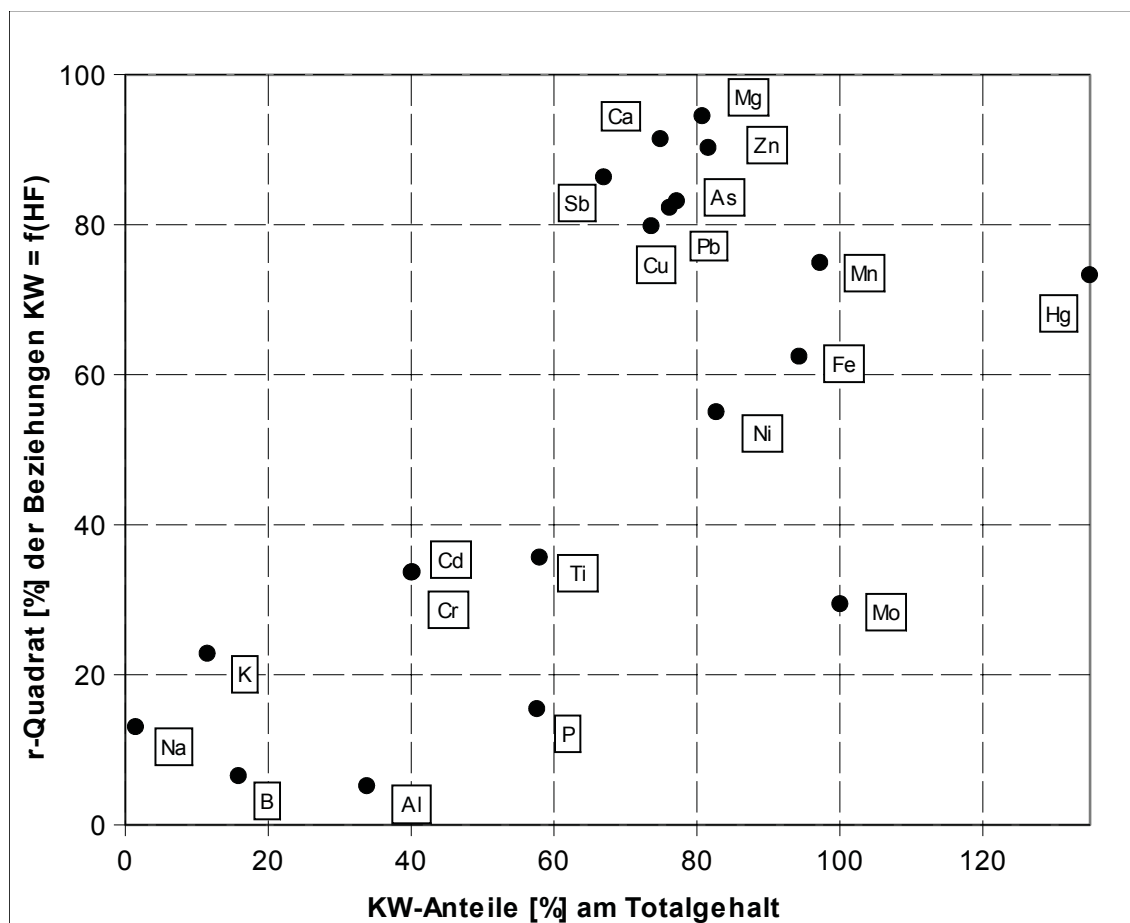


Abb.5.5.1 Darstellung des Bestimmtheitsmaßes r -Quadrat von Total- und Königswasser aufschluss und der Anteile der Königswasser aufgeschlossenen Gehalte am Gesamtgehalt

In Abb. 5.5.1 wurde ein Vergleich von Königswasser- und Totalaufschluss, auf Grundlage der Einzelmessergebnisse der in dieser Arbeit abgehandelten BDF, durchgeführt. Dabei ist auf der Ordinate der Zusammenhang von Totalaufschluss (HF) und Königswasseraufschluss (KW) in Form des Bestimmtheitsmaßes (r^2) in % abgetragen. Die Abszisse stellt den prozentualen Anteil des jeweils mittels Königswasseraufschluss bestimmten Schwermetallgehaltes am Gesamtgehalt (Totalaufschluss) dar. Es wird deutlich, dass für Kupfer, Blei und Zink ein großer Zusammenhang (r^2) von über 80 % besteht. Eine geringere Übereinstimmung liegt hingegen mit ca. 35 % bei Cadmium vor. Die Bestimmung von Quecksilber führte bei dem Königswasseraufschluss zum Nachweis höherer Gehalte als bei dem Gesamtaufschluss (130 %). Das Bestimmtheitsmaß liegt für dieses Element bei ca. 75 %.

In Tab. 5.4.2 ist erkennbar, dass für den Ammoniumnitrat- aufschluss in einigen Jahren gleiche Werte für alle Elemente und alle Tiefenstufen bestimmt wurden. Dies weist auf methodische Probleme bei diesem Verfahren hin.

6 Diskussion

Die Ergebnisse der Königswasser aufgeschlossenen Schwermetallgehalte sind für Cadmium, Quecksilber, Kupfer und Zink aktuell unterhalb der jeweiligen Vorsorgewerte. Lediglich für Blei gab es im Jahr 1993 eine geringfügige Überschreitung, welche sich in den folgenden Jahren jedoch nicht bestätigte.

Bei allen Schwermetallen sind die vergleichsweise höchsten Gehalte im Oberboden (1. Tiefe) zu finden. Dies deutet auf einen anthropogenen Eintrag von Schadstoffen hin, da geogene Schwermetalle eher gleichmäßig über das gesamte Bodenprofil verteilt sind. Weiterhin sind die Schwermetallgehalte in der ersten Beprobungstiefe, mit Ausnahme von Kupfer, auf Grünland tendenziell höher als jene der drei Acker-BDF, obwohl die geogenen Gehalte für Cadmium und Kupfer wesentlich geringer, bzw. für Blei, Quecksilber und Zink identisch sind. Diese Akkumulation in den oberen Horizonten wurde auch in anderen Untersuchungen nachgewiesen (KÜHNEN & GOLDBACH 2004:57). Durch Bodenbearbeitung auf Ackerflächen findet eine ständige Durchmischung mit Material aus größeren Tiefen statt. Somit können in die erste Tiefe anthropogen eingetragene Schwermetalle, im Gegensatz zu Dauergrünland, vertikal verteilt und somit die Gehalte der ersten Tiefe „verdünnt“ werden. Durch den hohen Corg-Gehalt von ca. 3 % bis 6 % in der ersten Tiefe können im Gegensatz zu den Acker-BDF, mit einem Anteil von ca. 1 % bis 2 %, mehr Schwermetallkationen an die negativen Oberflächenladungen der Humusteilchen adsorbiert werden. Weiterhin ist die Höhenlage des Standortes auf 757 m über NN und eine damit verbundene stärkere atmosphärische Deposition zu beachten. Diese ist beispielsweise Folge eines höheren mittleren Jahresniederschlags sowie des schon angesprochenen Auskämmeffekts, durch die Kammlage des Standortes und eine damit verbundene vermehrte Nebelbildung.

Die geringeren Kupfergehalte auf BDF 11 können mit den geogenen Gehalten (Kapitel 5.1) erklärt werden. Diese sind auf BDF 11 mit ca. 5 mg/kg um ein sechsfaches geringer als auf den weiteren BDF mit ca. 30 mg/kg. Weiterhin werden die Ackerflächen mit Wirtschaftsdüngern behandelt, welche eine wichtige Eintragsquelle für Zink und Kupfer darstellen.

Die Bleigehalte sind auf BDF 11 in Tiefe 1 wesentlich höher als auf den restlichen BDF. Dies nicht mit den geogenen Gehalten zu begründen und kann auch in den weiteren Tiefenstufen nicht ausgemacht werden, sodass hier von einer anthropogen Ursache auszugehen ist. Größere Industriebetriebe konnten in der Umgebung von Oberweißbach (Thüringer Wald) nicht ausgemacht werden, allerdings existierte bis 1991 in weniger als 6 km Entfernung

südwestlich von Oberweißbach die Farbenfabrik zu Neuwerk bei Oelze. Dort wurden in der über 150 jährigen Unternehmensgeschichte unter anderem mehrere 100 t Bleiweiß und Bleichromat pro Jahr produziert. Mit der Schließung könnte auch der Rückgang der Gehalte seit der Erstmessung 1993 verbunden sein. Da eine Landesstraße nur ca. 150 m entfernt ist, kommt der Straßenverkehr, insbesondere im Hinblick auf die Einführung von bleifreien Benzinsorten Ende der 1980er Jahre, als eine weitere Eintragsquelle in Frage. Allerdings kann bezweifelt werden, dass jenes recht geringe Verkehrsaufkommen einen signifikanten Einfluss auf die Bleigehalte hat. Weiterhin spricht die große Standardabweichung gegen diese These. Die hohe Standardabweichung weist auf eine sehr heterogene Verteilung der Bleigehalte hin und kann beispielsweise durch das in Kapitel 4.4 beschriebene Zusammenfassen von Tiefenstufe 1 und 2 auf Grünland zustande gekommen sein. Nicht auszuschließen ist im Bezug auf die Überschreitung des Vorsorgewertes im Jahr 1993 ein Messfehler bzw. eine Verunreinigung der Probe.

Für die erhöhten Zinkgehalte im Jahr 1997, welche in allen drei Tiefen vorhanden sind, konnte keine Erklärung gefunden werden. Ein erhöhter anthropogen verursachter Eintrag ist unwahrscheinlich, da sich dieser ausschließlich in der ersten Tiefenstufe widerspiegeln würde. Wahrscheinlicher sind Fehlereinflüsse bei der Probenahme, z.B. durch Verunreinigungen, oder bei der Laboranalyse. Auch der Anstieg der Cadmiumgehalte im Jahr 1997 auf BDF 3 kann nicht erklärt werden.

Der Vergleich von Ammoniumnitrat-aufschluss und Königswasser bzw. Totalaufschluss zeigt, dass nur ein geringer Anteil der vorhandenen Schwermetalle auch tatsächlich pflanzenverfügbar ist. Weiterhin werden in den dargestellten Jahren keine Gehalte erreicht, die zu einer Beeinträchtigung im Hinblick auf die Pflanzenqualität führen könnten. Für Cadmium wird dabei weder der allgemeine Maßnahmenwert von 100 µg/kg, noch jener für Brotweizen und andere stark cadmiumanreichernde Gemüsearten von 40 µg/kg überschritten. Auch pflanzenverfügbares Blei unterschreitet den vorgegebenen Prüfwert von 100 µg/kg deutlich. Die höchsten pflanzenverfügbaren Gehalte aller Schwermetalle konnten in der zweiten und dritten Tiefenstufe von BDF 9 ermittelt werden. Diese sind auf die anaeroben Bedingungen im Sw- und Sd- Horizont dieses als Pseudogley angesprochen Standortes und der damit verbundenen hohen Mobilität der Ionen, zurückzuführen. Weiterhin können durch die Hanglage des Standortes, infolge von lateraler Wasserbewegung auf der stauenden Tonschicht, Schwermetalle aus den höher gelegenen Bereichen migrieren.

Die Untersuchung der Korrelationsverhältnisse ergab einen starken Einfluss der Corg-Gehalte auf die Königswasser aufgeschlossenen Schwermetallgehalte. Insbesondere auf

BDF 11 mit einem hohen Corg-Gehalt in der obersten Tiefe, konnte dies nachgewiesen werden. Der pH-Wert hat eher Einfluss auf die Mobilität von Schwermetallen. Aufgrund dessen wäre hier eine stärkere Korrelation mit den pflanzenverfügbaren Gehalten als mit den Königswasser aufgeschlossenen Schwermetallen zu vermuten. Dies müsste allerdings durch weitere Untersuchungen bestätigt werden. Auch Einfluss des Tongehaltes wurde in dieser Analyse wahrscheinlich von dem starken Einfluss des Corg-Gehaltes überlagert.

Der Methodenvergleich ergab eine gute Korrelation von Königswasser und Totalaufschluss für Blei, Kupfer und Zink. Bei Quecksilber erwies sich der Totalaufschluss als ungeeignet, da mit diesem geringere Gehalte als mit dem Königswasseraufschluss bestimmt werden konnten. Dies ist mit einer Verflüchtigung des Quecksilbers bei dem Totalaufschluss zu begründen. Als Konsequenz wird Quecksilber nach neuer Methode nicht mehr aufgeschlossen, sondern aus der Festsubstanz bestimmt. Der im Rahmen dieser Arbeit berechnete Königswasser extrahierte Gehalt am Gesamtgehalt ist mit 40 % (Cadmium) bzw. 70 % bis 80 % (Blei, Kupfer, Zink) geringer als dies nach den in Kapitel 4.3 aufgeführten Literaturwerten zu vermuten wäre. Dies kann auf einen recht geringen Datenumfang durch die vier betrachteten BDF zurückgeführt werden.

Die Critical Loads stellen ein Konzept zur vorsorgenden Vermeidung zu hoher Schwermetalleinträge dar. So können bei einer flächendeckenden Überschreitung Maßnahmen, wie eine Reduzierung der Grenzwerte für die Emission von Schwermetallen, ergriffen werden um eine langfristige Anreicherung im Boden zu vermeiden. Für Deutschland kam es verbreitet zur Überschreitung der Critical Loads für Blei und Quecksilber, weniger im Zusammenhang mit Cadmium (UBA 2012:o.S.). Ein allgemeines Problem bei der Berechnung stellen derzeit die atmosphärischen Einträge dar, da aufgrund ungenauer Emissionsberichterstattungen in Deutschland und weiteren europäischen Ländern flächendeckende Daten fehlen.

7 Fazit und Ausblick

Die Untersuchungen dieser Arbeit ergaben eine unbedenkliche Schwermetallbelastung auf landwirtschaftlich genutzten Bodendauerbeobachtungsflächen. Eine Anreicherung der fünf betrachteten Schwermetalle im Boden konnte, im Hinblick einer Gefährdung der Bodenfunktionen auf Grundlage der untersuchten Flächen für Thüringen nicht bestätigt werden. Geringfügige Zu- und Abnahmen lagen im Bereich der Standardabweichung. Um eine repräsentative Aussage für ganz Thüringen treffen zu können, wäre die Auswertung der Daten aller 32 BDF nach dem hier vorgestellten Verfahren, sowie ein Vergleich dieser Arbeit mit anderen Abhandlungen über die Schwermetallbelastung von Böden notwendig.

Zukünftig kann es insbesondere in der Landwirtschaft zu erhöhten Einträgen an Schwermetallen in die Böden kommen. Vermehrter Düngemitelesatz aufgrund einer steigenden Weltbevölkerung, bzw. die Verwendung von stark mit Schwermetallen verunreinigten Düngern durch eine Erschöpfung derzeitiger, weniger belasteter Rohstoffvorkommen, birgt ein solches Gefahrenpotential. Aufgrund dessen ist auch die zukünftige Überwachung der Böden von großer Bedeutung.

Weiterer Forschungsbedarf im Rahmen der Bodendauerbeobachtung besteht im Zusammenhang mit dem Klimawandel und möglichen Landnutzungsänderungen. So könnte eine Umwandlung von Dauergrünland in Ackerland, beispielsweise im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energien, zu einem Verlust an organischen Material führen. Wie in den vorangegangenen Kapiteln deutlich wurde sind daran Schwermetalle adsorbiert. Ein Verlust könnte eine Mobilisierung dieser zuvor gebundenen Schwermetallen zur Folge haben. Der Klimawandel könnte durch höhere Temperaturen zu größerer mikrobiologischer Aktivität und einer damit verbundenen schnelleren Zersetzung von organischem Material führen, was die gleichen Auswirkungen hätte. Weiterhin könnten geringere Niederschläge zu einer Verringerung der Schwermetallausträge führen, was bei gleichen Eintragsmengen zu einer Anreicherung im Boden führen kann. Von weiterem Forschungsinteresse ist in diesem Zusammenhang auch die Wirkung des Bodens als Speicher bzw. Quelle für Schwermetalle.

Literatur

- AG BD THÜRINGEN (2006): Boden- Dauerbeobachtungsflächen im Freistaat Thüringen. Einführung und Überblick über die Boden-Dauerbeobachtung im Freistaat Thüringen.- Fachstandpunkte der TLUG 2006, 10, 1-23.
- ALLOWAY, B.J. (1999): Schwermetalle in Böden. Analytik, Konzentration, Wechselwirkungen. Berlin: Springer.
- AH BOGWS (Arbeitshilfen Boden- und Grundwasserschutz) (2012): Bewertung von Schadstoffkonzentrationen <http://www.arbeitshilfen-bogws.de/kapitel_5.2.3.2.html> (Stand: 2012-07-10) (Zugriff: 2013-08-11).
- BARTH, N., BRANDTNER, W., CORDSEN, E., DANN, T., EMMERICH, K.H., FELDHAUS, D., KLEEFISCH, B. SCHILLING, B. & J. UTERMANN (2001): Boden-Dauerbeobachtung. Einrichtung und Betrieb von Boden-Dauerbeobachtungsflächen. In: ROSENKRANZ, D., BACHMANN, G. & W. KÖNIG (Hrsg.): Bodenschutz. Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Band 3. Berlin: Erich Schmidt.
- BÄUMLER, R. (2007): Der Boden als gefährdete Ressource. In GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U. & P. REUBER (Hrsg.): Geographie. Physische Geographie und Humangeographie. Heidelberg: Spektrum, 363.
- BBODSCHG (Bundes-Bodenschutzgesetz) (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten, <http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/boden/downloads/Bundes_Bodenschutzgesetz.pdf> (Stand: 1998-03-17) (Zugriff: 2013-07-08).
- BBODSCHV (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung) (1999): <http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/boden/downloads/Bundes_Bodenschutzverordnung.pdf> (Stand: 1999-07-12) (Zugriff: 2013-07-08).
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2009): Zweiter Bodenschutzbericht der Bundesregierung. Berlin: BMU
- BUND-LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ (LABO) (2003)³: Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. Saarbrücken: LABO.

- DIE KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN: (2006): Verordnung zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/site/de/oj/2006/l_364/l_36420061220de00050024.pdf> (Stand: 2006-12-06) (Zugriff: 2013-07-08).
- EURACTIV (Hrsg.) (2011): Besonders Vegetarier gefährdet: zu hoher Cadmium-Gehalt in Düngern. EU soll Schwermetalle in Böden reduzieren. <<http://www.euractiv.de/druck-version/artikel/eu-soll-schwermetalle-in-bden-reduzieren-004774>> (Stand: 2011-05-06) (Zugriff: 2013-07-08).
- FIEDLER, H.J. & H.J. RÖSLER (1987): Spurenelemente in der Umwelt. Umweltforschung. Jena: Gustav Fischer Verlag.
- GAUGER, T. HAENEL, H. D., RÖSEMANN, C. NAGEL, H. D., BECKER, R., KRAFT, P., SCHLUTOW, A., SCHÜTZE, G., WEIGELT-KIRCHNER, R. & F. ANSELM (2008): Nationale Umsetzung UNECE-Luftreinhaltekonvention. Teil 2: Wirkungen und Risikoabschätzungen Critical Loads, Biodiversität, Dynamische Modellierung, Critical Levels Überschreitungen, Materialkorrosion. - Texte 08, 39, 1-275
- GSF (Global Soil Forum) (2012): Fruchtbare Böden : Entscheidend für den Kampf gegen Hunger und Klimawandel! <http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/iass_gsw_media_sheet_boeden_de.pdf> (Stand: 2012-10) (Zugriff: 2013-07-08).
- GULLICH, P., MARRE, G., PAUL, R., PFLEGER, I., WEBER, W. & U. PRÜFER (2006): Bodendauerbeobachtung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Monitoring zur Erfassung von Veränderungen wesentlicher Bodenfunktionen. Jena: TLL.
- HEINTZ, A. & G.A. REINHARDT, (1996⁴): Chemie und Umwelt: Ein Studienbuch für Chemiker, Physiker, Biologen und Geologen. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.
- HINDEL, R., GEHRT, E., KANTOR, W., WEIDNER, E. (2004): Spurenelementgehalte in Böden Deutschlands: Geowissenschaftliche Grundlagen und Daten. In: ROSENKRANZ, D., BACHMANN, G. & W. KÖNIG (Hrsg.): Bodenschutz. Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Band 3. Berlin: Erich Schmidt.
- HOLLEMAN, A.F., WIBERG, E. & N. WIBERG (1995¹⁰¹): Lehrbuch der anorganischen Chemie. Berlin [u.a.]: de Gruyter.
- KÜHNEN, V. & H. E. GOLDBACH (2004): Schwermetallbilanzen verschiedener Betriebstypen: Eintragswege, Flüsse, Minderungspotential. Bonn: Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL

- MARAHRENS, S. (2009): UBA - Boden und Altlasten - Bodenschutz in Europa, <http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/boden/bodenschutz/europa.htm> (Stand: 2010-09-07) (Zugriff: 2013-07-08).
- MATSCHULLAT, J., Tobschall, H.J. & H.-J. Voigt (Hrsg.) (1997): Geochemie und Umwelt Relevante Prozesse in Atmo-, Pedo- und Hydrosphäre. Berlin: Springer.
- HUSCHEK, G. & D. KRENGEL (2004): Länderübergreifende Auswertung von Daten der Boden- Dauerbeobachtung der Länder. Berlin:Umweltbundesamt
- LEWANDOWSKI, J., KOSS, V. & LEITSCHUH, S. (1997): Schadstoffe im Boden. Eine Einführung in Analytik und Bewertung. Berlin [u.a.]: Springer.
- NAGEL, H.-D. & H.-D. GREGOR (1999): Oekologische Belastungsgrenzen: Critical loads & levels ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Berlin: Springer.
- NICKEL INSTITUTE (2006): „Heavy Metal“ Does Not Necessarily Mean „Toxic“. Lumping Nickel with other heavy metals does a great disservice to a metal critical to many useful alloys. - Nickel 21, 4, S. 6.
- POHL, A., WENDLER, F., WALSCH, A., RAU, D., SCHEIBERT, C., WUNDERLICH, J. (1996): Schwermetallgehalte Thüringer Böden. Ausstattung und Belastbarkeit Thüringer Böden mit Schwermetallen Geogene Grundgehalte und Hintergrundwerte. Erfurt: Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt.
- SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (2010¹⁶): Lehrbuch der Bodenkunde. Heidelberg: Spektrum.
- SCHÖNBUCHNER, H. (2002): Untersuchungen zu Mobilität und Boden-Pflanze-Transfer von Schwermetallen auf/in uranhaltigen Haldenböden. Jena: Friedrich Schiller Universität.
- TLUG (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie) (2006): Boden-Dauerbeobachtungsflächen im Freistaat Thüringen. Einführung und Überblick über die Boden-Dauerbeobachtung im Freistaat Thüringen. - Fachstandpunkte der TLUG, 10, 1-22.
- TLUG (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie) (2007): Bodendauerbeobachtung im Freistaat Thüringen. <<http://www.tlug-jena.de/bodendauerbeobachtung/index.html>> (Stand: 2013-06-07) (Zugriff: 2013-09-01).
- TLUG (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie) (2008): Bodendauerbeobachtung im Freistaat Thüringen. <http://www.tlug-jena.de/bodendauerbeobachtung/08i_map.html> (Stand: 2008-11) (Zugriff: 2013-09-01)
- UBA (Umwelt Bundes Amt) (2002): Boden-Dauerbeobachtung in Deutschland. Ergebnisse aus den Ländern. Berlin: UBA.

- UBA (Umwelt Bundes Amt) (2012): Critical Loads für Schwermetalle.
<<http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?NodeIdent=5537>> (Stand: 2012-03) (Zugriff: 2013-09-01).
- ZEHL, K. (2005): Schwermetalle in Sedimenten und Böden unter besonderer Berücksichtigung der Mobilität und deren Beeinflussung durch Sauerstoff. Jena: Friedrich Schiller Universität.
- ZORN, W., HESS, H., ALBERT, E., KOLBE, H., KERSCHBERGER, M. & G. FRANKE (2007): Düngung in Thüringen 2007 nach „Guter fachlicher Praxis“. Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen 7. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorgelegte Hausarbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen verwendet und die den benutzten Quellen entnommenen Passagen als solche kenntlich gemacht habe.

Weiterhin erkläre ich, dass diese Arbeit in dieser oder einer ähnlichen Form in keinem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt wurde.

.....

Datum

.....

Unterschrift

Anhang

Untersuchungsprogramm auf den landwirtschaftlichen BDF der TLL

Untersuchungsprogramm auf den landwirtschaftlichen BDF der TLL					
(In roter Schrift sind die lt. LABO obligatorischen Parameter gekennzeichnet)					
Bodenchemie		Zeitpunkt	Turnus		
TM, NH ₄ -N, NO ₃ -N, Smin		Frühjahr nach Ernte und Herbst	jährlich		N_F,S,H
TM, pH, P, K, Mg, hydrol. Azidität, Salzgehalt		nach Ernte	jährlich		BC_1
Na(CAL), Corg ; CaCO₃ , Mt , St , Chlorid		nach Ernte	alle 5 Jahre		BC_5
KAKpot : T-Wert, H-Wert, S-Wert (Ca, Mg, K, Na) bei pH-Wert > 6,5		nach Ernte	alle 5 Jahre		BC_5
KAKeff : T-Wert, H-Wert, S-Wert (Ca, Mg, Na, K, Al, H, Mn, Fe) bei pH-Wert < 6,5		nach Ernte	alle 5 Jahre		BC_5
pflanzenverfügbar (nach klassischer Methode): B, Mo, Zn, Cu, Mn, Fe		nach Ernte	alle 5 Jahre		BC_5
Königswasseraufschluß : Ca, P, K, Mg, Na, S, Cu, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn, Hg, As , Ti, Sb, Mo, Mn, B, Fe, Al		nach Ernte	alle 5 Jahre		BC_5
Ammoniumnitratextraktion : Cu, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn, As, Ti, Sb, Mo, Mn, B, Fe		nach Ernte	alle 5 Jahre		BC_5
HF-HNO₃-Druckaufschluß : Ca, P, K, Mg, Na, Cl, Cu, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn, Hg, As, Ti, Sb, Mo, Mn, B, Fe, Al, V		nach Ernte	alle 5 Jahre		BC_5
K-fix naß+tro, Ksa, Psl, Pfr		nach Ernte	alle 5 Jahre		BC_5
organische PSM: CKW (PCB) , Triazine, PAK (30 Wirkstoffe)		nach Ernte	alle 5 Jahre		BC_5
Bodenphysik					
Rohdichte trocken		Frühjahr	alle 2 Jahre		PH_S
Wasserdurchlässigkeit (kf-Wert)		Frühjahr	alle 2 Jahre		PH_S
pF-Wert je Stufe und Probe pf 1,8 und 2,5		Frühjahr	alle 2 Jahre		PH_S
pF 4,2 (permanenter Welkepunkt)		Frühjahr	alle 2 Jahre		PH_B
Aggregatdichte (4 Wiederholungen)		Frühjahr	alle 2 Jahre		PH_B
Bodenbiologie					
Lumbricidenanzahl, -gewicht					
Einordnung adult, juvenil, Artenbestimmung (Tief-, Flachgräber)		April/Mai	alle 2 Jahre		BBL
Koderfreistrentest (Zelluloseabbau)		April/Mai	alle 2 Jahre		BBL
Katalasezahl, mikrob. Biomasse, Bodenatmung		Frühjahr	jährlich		BBK
Pflanzen					
Ertrag (Hauptprodukt, Koppelprodukt)		Ernte	jährlich		ERN
TS lutro, absolute TM		Ernte	jährlich		PC
N, P, K, Ca, Mg, S , Na, NO ₃ , Cd, Cr, Pb, Ni, As, Hg , Sb, Ti, B, Cu, Mn, Mo, Zn		Ernte	jährlich		PC
organische PSM: CKW (PCB) (31 Wirkstoffe)		Ernte	jährlich		OR_P
Schlagdaten					
Erfassung der auf der BDF durchgeführten Maßnahmen			laufend		
(Düngung, Bodenbearbeitung, Pflanzenschutz usw.)					
Maschinen, Geräte, Arbeitsbreite, Arbeitstiefe, Mittel, Aufwandsmengen, Gehalte					

Standortbeschreibungen (TLUG 2007:o.S.)

BDF 3 (Großobringen 2)

Teil 2/Standort- und Profildokumentation

Profilbeschreibung

Standort	Großobringen 2 (GROI2)	Substratsystematische Einheit:	(Kryo-)Löß
BDF-Nr.:	7	Bodensystematische Einheit:	Braunerde-Tschernosem

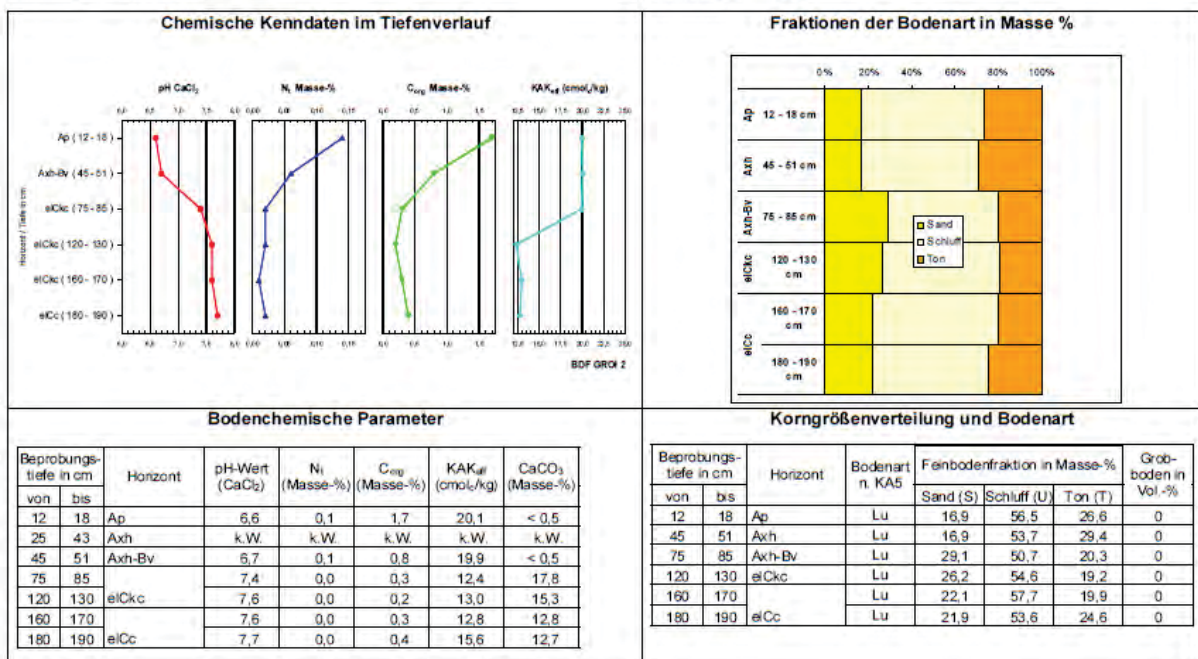
Profilbeschreibung		
Tiefe in cm	Horizont	Horizontbeschreibungen
0-25 cm	Ap	schluffiger Lehm (Lu), skelettfrei, Löß, mittel humos, carbonatfrei, geringe Lagerungsdichte
25-43 cm	Axh	schluffiger Lehm (Lu), skelettfrei, Löß, stark humos, carbonatfrei, geringe Lagerungsdichte
43-65 cm	Axh-Bv	schluffiger Lehm (Lu), skelettfrei, Löß, schwach humos, carbonatfrei, geringe Lagerungsdichte
65-110 cm	eICkc	schluffiger Lehm (Lu), skelettfrei, Löß, carbonatreich, hoher Flächenanteil großer Kalkkonkretionen (Lößkindl), sowie stark durchsetzt mit Kalkpseudomyzelien, hohe Lagerungsdichte
110-160 cm	eICkc	schluffiger Lehm (Lu), skelettfrei, Löß, carbonatreich, mittlerer Flächenanteil an Kalkkonkretionen (Lößkindl) und hoher an Kalkpseudomyzelien, mittlere Lagerungsdichte
160-195 cm	eICc	schluffiger Lehm (Lu), skelettfrei, Löß, carbonatreich, vereinzelt Kalkkonkretionen, hoher Anteil an Kalkpseudomyzelien, mittlere Lagerungsdichte



Teil 2/Standort- und Profildokumentation

Blatt 1: Chemische Kenndaten/Bodenart

Standort	Großobringen (GROI2)	Erstbeprobung	1992
Bodentyp	BB-TT	Substrattyp	p-6



Profilbeschreibung

Standort	Wöhlsdorf 1 (WOEHL1)	Substratsystematische Einheit:	schuffführender (Kryo-)Schluff über tiefem grusführenden (Kryo-)Sand
BDF-Nr.:	12	Bodensystematische Einheit:	Norm-Pseudogley



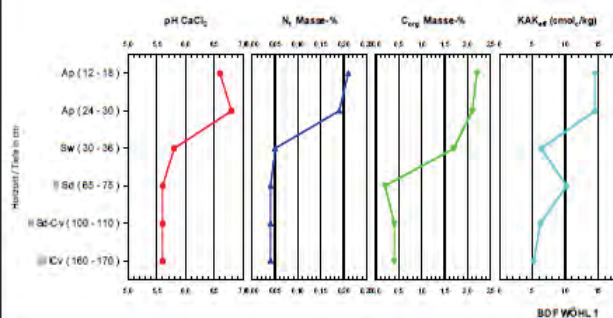
Profilbeschreibung

Tiefe in cm	Horizont	Horizontbeschreibungen
0-30 cm	Ap	schluffiger Lehm (Lu), 12 Vol. % Skelett (Tonschiefer), Lößlehm, Hauptlage, mittel humos, mittlere Lagerungsdichte, eisenfleckig
30-65 cm	Sw	mittel toniger Schluff (Ut3), 7 Vol. % Skelett (Tonschiefer), Lößlehm, Hauptlage, mittel humos, mittlere Lagerungsdichte, starke Bleichung sowie eisenfleckig
65-90 cm	II Sd	schluffig-lehmiger Sand (Slu), 13 Vol. % Skelett (Tonschiefer), Basislage, sehr schwach humos, hohe Lagerungsdichte, rostfleckig
90-145 cm	III Sd-Cv	schluffig-lehmiger Sand (Slu), 13 Vol. % Skelett (Tonschiefer), Basislage, hohe Lagerungsdichte, rostfleckig
145-180 cm	IV ICv	stark schluffiger Sand (Su4), 10 Vol. % Skelett (Tonschiefer), Basislage

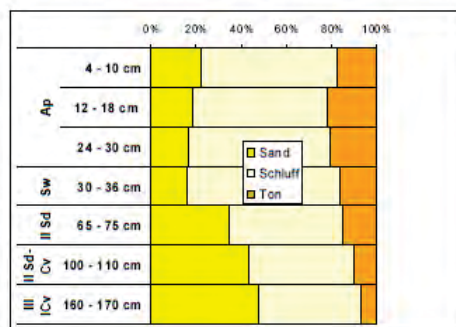
Blatt 1: Chemische Kenndaten/Bodenart

Standort	Wöhlsdorf 1 (WOEHL1)	Erstbeprobung	1992
Bodentyp	SSn	Substrattyp	p-(n)u/p-(z)

Chemische Kenndaten im Tiefenverlauf



Fraktionen der Bodenart in Masse %



Bodenchemische Parameter

Beprobungstiefe in cm	Horizont	pH-Wert (CaCl ₂)	N _t (Masse-%)	C _{org} (Masse-%)	KAK _{ref} (cmol/kg)	CaCO ₃ (Masse-%)
4 bis 10	Ap	6,2	0,2	1,9	14,6	0,7
12 bis 18		6,6	0,2	2,2	14,5	0,8
24 bis 30		6,8	0,2	2,1	14,5	1,1
30 bis 36	Sw	5,8	0,1	1,7	6,3	< 0,5
65 bis 75	II Sd	5,6	0,0	0,2	10,2	< 0,5
100 bis 110	II Sd-Cv	5,6	0,0	0,4	6,2	< 0,5
160 bis 170	III ICv	5,6	0,0	0,4	5,2	< 0,5

Korngrößenverteilung und Bodenart

Beprobungstiefe in cm		Horizont	Bodenart n. KAS	Feinbodenfraktion in Masse-%			Grob-boden in Vol.-%
von	bis			Sand (S)	Schluff (U)	Ton (T)	
4	10	Ap	Lu	21,9	60,8	17,3	12
12	18		Lu	18,3	59,6	21,9	
24	30		Lu	16,6	62,7	20,5	
30	36	Sw	Ut3	15,9	68,0	16,1	7
65	75	II Sd	Slu	34,9	49,8	15,3	13
100	110	II Sd-Cv	Slu	43,1	47,0	10,0	13
160	170	III ICv	Su4	47,4	45,6	6,9	10

Profilbeschreibung

Standort	Wöhlsdorf 2 (WOEHL2)	Substratsystematische Einheit:	schuttführender Hangschluff über tiefem (Kryo-)Gruschluff
BDF-Nr.:	2	Bodensystematische Einheit:	Kolluvisol - Pseudogley



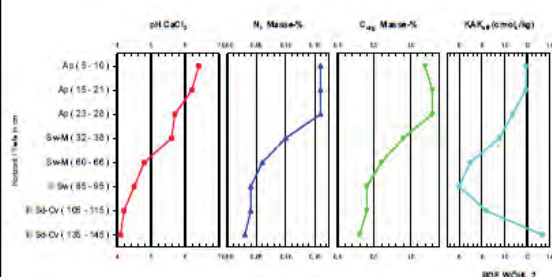
Profilbeschreibung

Tiefe in cm	Horizont	Horizontbeschreibungen
0-30 cm	Ap	sandig-lehmiger Schluff (Uls), 17 Vol. % Skelett, mittel humos, sehr geringe Lagerungsdichte
30-80 cm	Sw-M	sandig-lehmiger Schluff (Uls), 15 Vol. % Skelett, schwach humos, mittlere Lagerungsdichte, stark gebleicht und eisenfleckig
80-100 cm	II Sw	sandig-lehmiger Schluff (Uls), 26 Vol. % Skelett, Hauptlage, mittlere Lagerungsdichte, stark gebleicht und eisenfleckig
100-150 cm	III Sd-Cv	schluffiger Lehm (Lu), 22 Vol. % Skelett, hohe Lagerungsdichte, Rostflecken

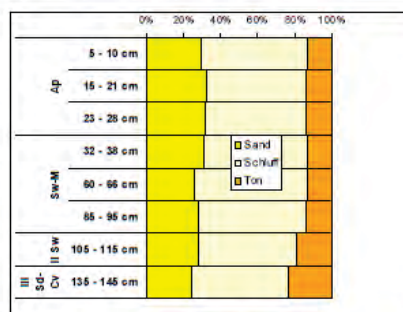
Blatt 1: Chemische Kenndaten/Bodenart

Standort	Wöhlsdorf 2 (WOEHL2)	Erstbeprobung	1992
Bodentyp	YK-SS	Substratyp	u-(n)u/p-zu

Chemische Kenndaten im Tiefenverlauf



Fraktionen der Bodenart in Masse %



Bodenchemische Parameter

Beprobungstiefe in cm	Horizont	pH-Wert (CaCl ₂)	N _t (Masse-%)	C _{org} (Masse-%)	KAK _{pot} (cmol/kg)	CaCO ₃ (Masse-%)
5-10	Ap	6.4	0.2	1.2	11.9	0.7
15-21		6.2	0.2	1.3	11.9	1.0
23-28		5.7	0.2	1.3	10.7	0.5
32-38	Sw-M	5.6	0.1	0.9	9.5	0.6
60-66		4.8	0.1	0.6	7.0	< 0.5
85-95	II Sw	4.5	0.0	0.4	6.0	0.7
105-115	III Sd-Cv	4.2	0.0	0.4	8.4	< 0.5
135-145		4.1	0.0	0.3	13.3	< 0.5

Korngrößenverteilung und Bodenart

Beprobungstiefe in cm	Horizont	Bodenart n. KA5	Feinbodenfraktion in Masse-%			Grob-boden in Vol.-%
von bis			Sand (S)	Schluff (U)	Ton (T)	
5-10	Ap	Uls	29.4	57.3	13.4	17
15-21		Uls	32.2	54.1	13.6	
23-28		Uls	31.7	54.2	14.1	
32-38	Sw-M	Uls	30.4	56.2	13.3	15
60-66		Uls	26.1	60.9	12.9	
85-95	II Sw	Uls	27.7	58.3	13.9	26
105-115	III Sd-Cv	Lu	28.5	52.5	19.0	
135-145	III Sd-Cv	Lu	24.2	52.8	23.0	22

BDF 11 (Oberweißbach 1)

Teil 2/Standort- und Profildokumentation

Profilbeschreibung

Standort	Oberweißbach 1 (OBE1)	Substratsystematische Einheit:	(Kryo-)Schluffschutt über (Kryo-)Schutt
BDF-Nr.:	90	Bodensystematische Einheit:	Norm-Braunerde



Profilbeschreibung

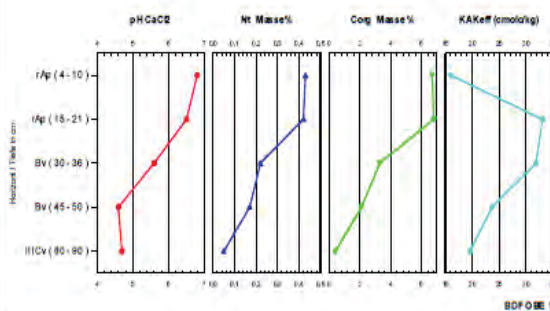
Tiefe in cm	Horizont	Horizontbeschreibungen
0-25 cm	rAp	sandig-lehmiger Schluff (Uls), 57 Vol. % Skelett, Lößlehm, Tonschiefer, Hauptlage, mittel humos, geringe Lagerungsdichte, carbonatfrei
25-50 cm	Bv	sandig-lehmiger Schluff (Uls), 62 Vol. % Skelett, Lößlehm, Tonschiefer, Hauptlage, mittlere Lagerungsdichte, carbonatfrei
50-65 cm	Bv-Cv	sandig-lehmiger Schluff (Uls), 55 Vol. % Skelett, Lößlehm, Tonschiefer, Hauptlage, carbonatfrei
65-90 cm	II ICv	mittel schluffiger Sand (Su3), 80 Vol. % Skelett, Tonschiefer, Basislage, carbonatfrei

Blatt 1: Chemische Kenndaten/Bodenart

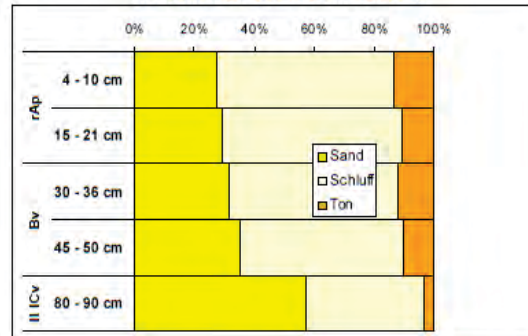
Teil 2/Standort- und Profildokumentation

Standort	Oberweißbach 1 (OBE1)	Erstbeprobung	1992
Bodentyp	BBn	Substrattyp	p-un/p-n

Chemische Kenndaten im Tiefenverlauf



Fractionen der Bodenart in Masse %



Bodenchemische Parameter

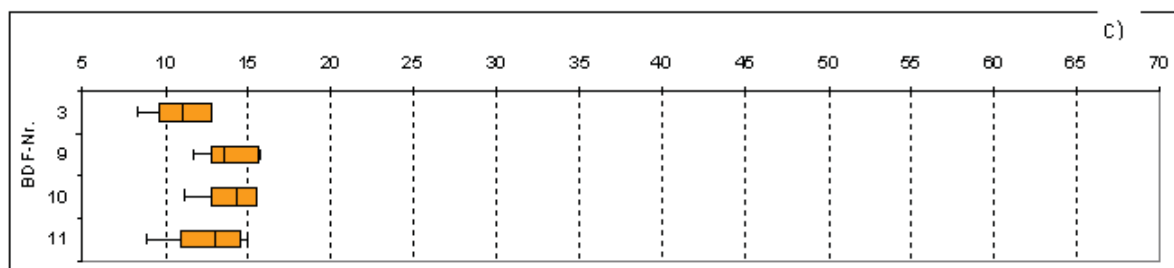
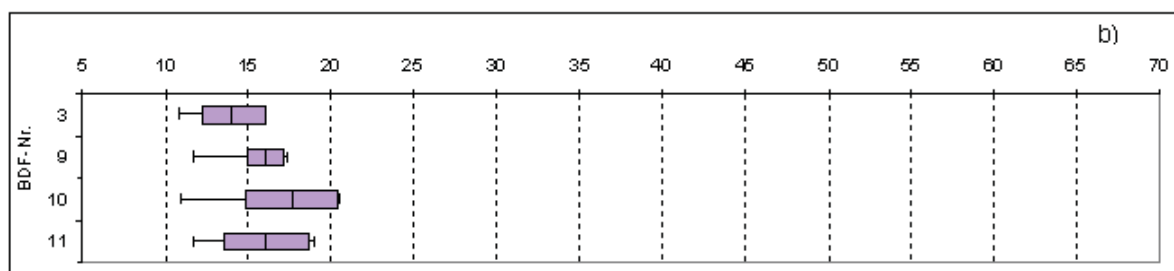
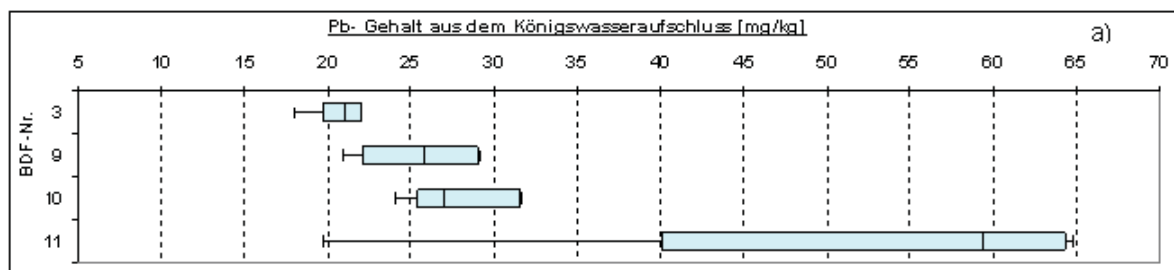
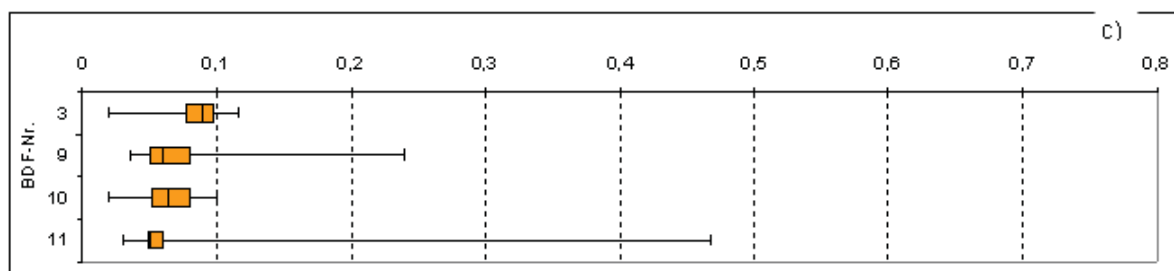
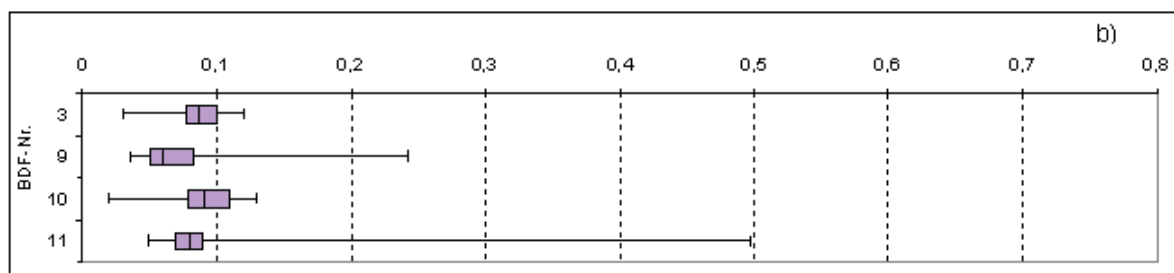
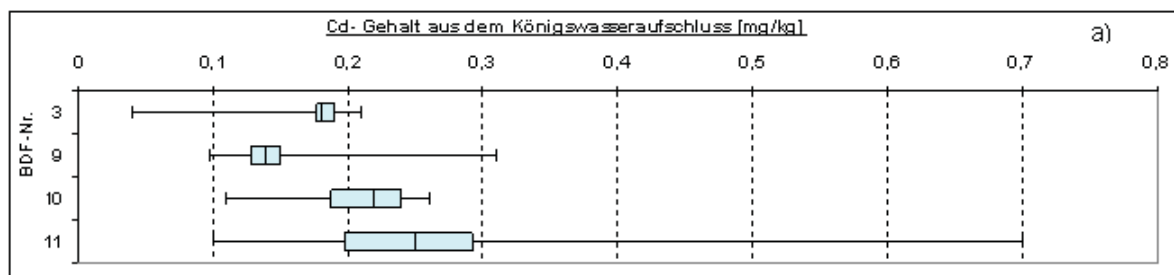
Beprobungstiefe in cm von bis	Horizont	pH-Wert (CaCl ₂)	N _t (Masse-%)	C _{org} (Masse-%)	KAK _{eff} (cmol/kg)	CaCO ₃ (Masse-%)
4 10	rAp	6,8	0,4	6,7	33,0	1,0
15 21		6,5	0,4	6,8	31,8	1,2
30 36		5,6	0,2	3,3	23,7	0,5
48 53	Bv	4,6	0,2	2,1	19,6	< 0,5
80 90	II ICv	4,7	0,1	0,4	3,2	0,5

Korngrößenverteilung und Bodenart

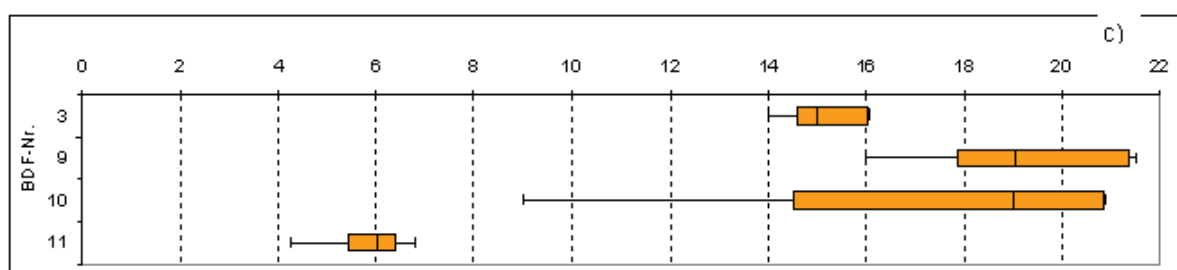
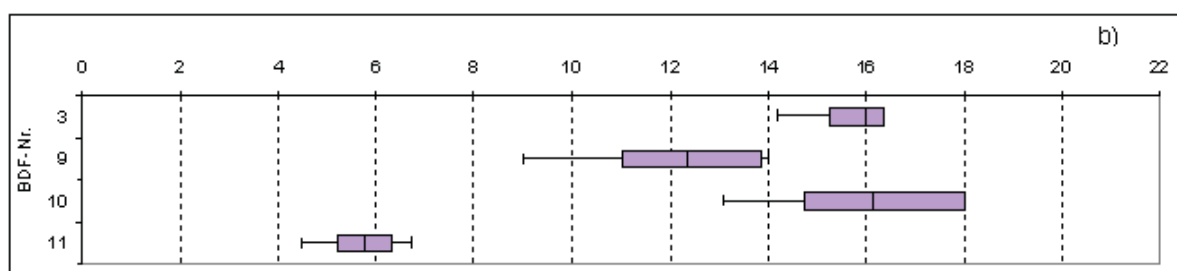
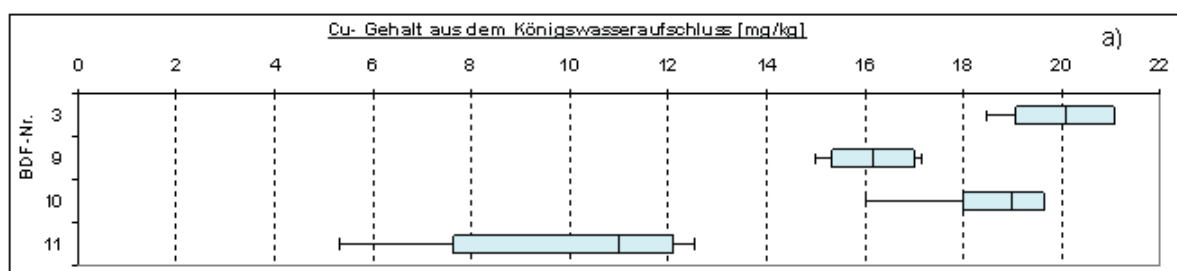
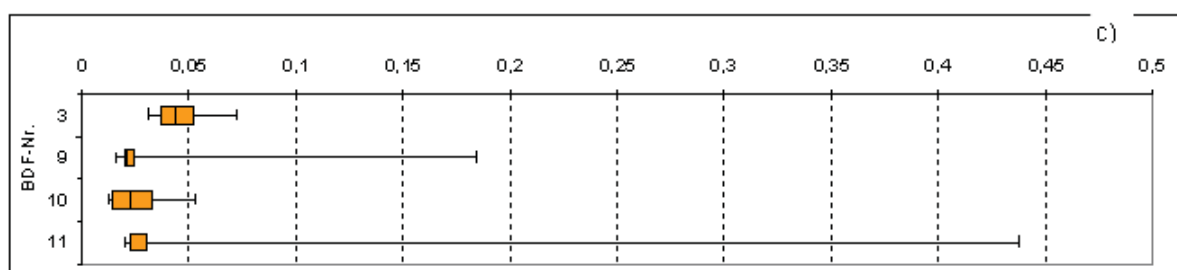
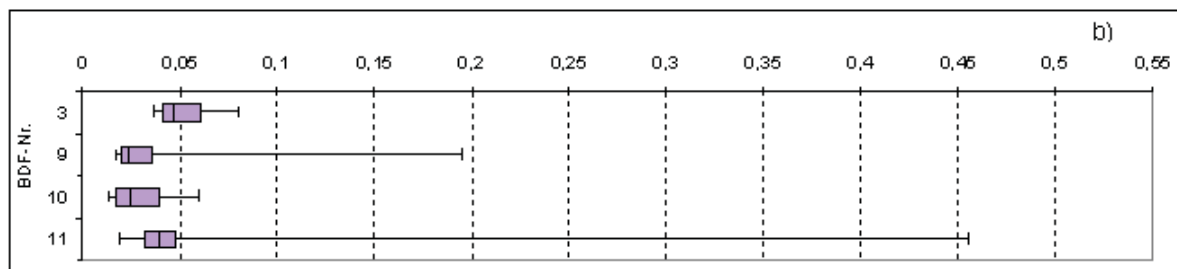
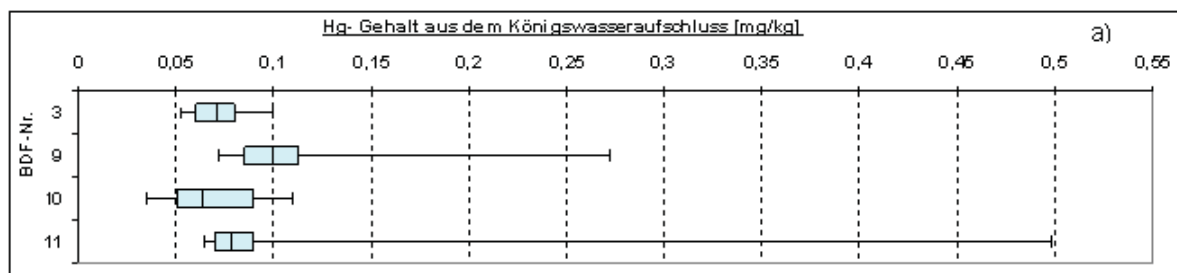
Beprobungstiefe in cm von bis	Horizont	Bodenart n. KAS	Feinbodenfraktion in Masse-%			Grob-boden in Vol.-%
			Sand (S)	Schluff (U)	Ton (T)	
4 10	rAp	Uls	27,5	59,1	13,4	57
15 21		Uls	29,1	60,3	10,6	
30 36		Uls	31,8	56,6	11,6	
48 53	Bv	Uls	35,3	54,6	10,0	62
80 90	II ICv	Su3	57,3	39,3	3,3	80

Darstellung der Verteilung Königswasser extrahierter Schwermetallgehalte als Boxplots

Boxplots Cadmium und Blei für a) Tiefe 1; b) Tiefe 2; c) Tiefe 3



Boxplots Quecksilber und Zink für a) Tiefe 1; b) Tiefe 2; c) Tiefe 3



Boxplots Kupfer für a) Tiefe 1; b) Tiefe 2; c) Tiefe 3

